Koordinierte Selbstorganisation und selbstorganisierte Koordination

Eine formale Spezifikation reflexiver Selbstorganisation in Multiagentensystemen unter spezieller Berücksichtigung der sozialwissenschaftlichen Perspektive

Habilitationsschrift

eingereicht an der

Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

der

Universität Hamburg

von

Dr. Michael Köhler-Bußmeier

Gutachter:
Prof. Dr. Rüdiger Valk (Universität Hamburg)
Prof. Dr. Jürgen Dix (TU Clausthal-Zellerfeld)
Prof. Dr. Otthein Herzog (Universität Bremen)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung meiner Forschungsarbeit auf dem Gebiet der *Sozionik* dar. Sozionik ist eine junge, interdisziplinäre Forschungsdisziplin im Schnittfeld von Soziologie und Informatik, die von 1999 bis 2005 von der DFG im Rahmen eines Schwerpunktprogramms gefördert wurde.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein sozionisches Modell von Multiagentensystemen zu entwickeln, d.h. ein formales Modell, das in sozialwissenschaftlich befriedigender Weise die wechselseitige Bedingtheit zwischen Mikro- und Makrophänomenen berücksichtigt. Will man speziell selbstorganisierende Multiagentensysteme entwerfen, so folgt aus der wechselseitigen Bedingtheit, dass auch die Selbstorganisation ein wechselseitiger, d.h. reflexiver Prozess ist, der von den Agenten in Form von koordinierter Interaktion erbracht wird. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich auch der Titel der Arbeit: Koordinierte Selbstorganisation und selbstorganisierte Koordination. Der erste Aspekt der koordinierten Selbstorganisation betont, dass der Prozess organisiert wird, mithin ein Makrophänomen darstellt, während der zweite Aspekt der selbstorganisierten Koordination betont, dass der Prozess von den Akteuren koordiniert wird, mithin ein Mikrophänomen darstellt. Beide Aspekte werden in dieser Arbeit gleichermaßen berücksichtigt.

Abstract

The contribution presents a summary of my research in the area of *socionics*. Socionics is a young, inter-disciplinary academic field in the intersection of sociology and computing science, which has been funded by the DFG in a program of emphasis.

The aim of this work is to provide a socionical model of multi-agent systems, i.e. a formal model that captures the reciprocal conditionality of micro and macro phenomena in a manner that is also satisfying for the social science. If in particular one designs self-organising multi-agent systems, this reciprocality implies that self-organisation is also a reciprocal process that is established by the system's agents. This fundamental aspect is reflected by the contribution's title: Coordinated self-organisation and self-organised coordination. The first aspect points out that self-organisation is a process which is embedded in organisational structures – the macro level view on the system – while the second emphasises that the the coordination process is carried out as by the agents' interactions – the micro level view. Both perspective are mutually dependent and are considered equally in this work.

Inhaltsverzeichnis

1 Der Forschungsgegenstand der Sozionik **1**

I Selbstorganisation in Multiagentensystemen **5**

2 Emergenz, Selbstorganisation und Komplexität **9**
2.1 Systeme und Systemdynamik 10
2.2 Chaos und Nichtlinearität 12
2.3 Maschinenmodelle und Rückkopplung 23
2.4 Komplexität und Ordnung 38
2.5 Emergenz und Reduktionismus 45
2.6 Selbstordnung und Synergetik 49

3 Koordinierung in Agentensystemen **55**
3.1 Grundelemente der Multiagentensysteme 55
3.2 Koordination: Kooperation und Konkurrenz 65
3.3 Normative Agenten und Institutionen 69
3.4 Multiagentensystemorganisationen 75
3.5 Soziale Theorien der Agentensysteme 83

II ASKO: Modellierung sozialer Akteure **89**

4 Methodologische Anmerkungen **93**
4.1 Zum Wesen der Theoriemodellierung 94
4.2 Vermittelnde Netze als sozionisch fundierte Darstellungstechnik . 96
4.3 Nebenläufigkeit und Petrinetze 102
4.4 Platz/Transitions-Netze 107
4.5 Prozesse von Petrinetzen 117

5 Soziologische Einflüsse **123**
5.1 Grundlinien soziologischer Theoriebildung 125
5.2 Individualismus: Akteursmodelle 131
5.3 Intersubjektivität: Strukturdynamik 147
5.4 Organisationstheorie: strukturierte Handlungsfelder 157

6 Mikro/Makro-Wechselwirkungen **175**
6.1 Dualität: Der Mikro/Makro-Bezug 176
6.2 Norbert Elias: Kontrolle und Internalisierung und Kernkonzepte . 180
6.3 Pierre Bourdieu: Symbolkampf und Habitus/Feld 206

6.4 Heinrich Popitz: Ordnung und Investitionswert 233
6.5 Mehrebenenmodell der Mikro/Makro-Verbindung 246

III DISPO: Agentensysteme als reflexive, soziale Praxisformen 261

7 Der Konstitutionsmechanismus sozialer Systeme 265
7.1 Praktische Anerkennung als sozial konstitutiver Prozess 266
7.2 Strukturelles Vermögen – Vermögensstrukturen 276
7.3 Reflexive Symbolisierung – symbolische Reflexion 284
7.4 Die Konstitutionsdynamik im Überblick 296
7.5 Zur Gesamtstruktur des sozialen Konstitutionsmechanismus . . . 299

8 Ein Rahmenmodell reflexiv selbstorganisierender Systeme 307
8.1 Prädisposition als Theoriesymmetrie 308
8.2 Systeme von Handlungsregeln 314
8.3 Autopoiese als rekursive Erzeugung von Handlungsregeln 320
8.4 Entitätensysteme als Agenten 323
8.5 Modellierung sozionischer Agenten 327

IV SONAR: Eine sozialtheoretisch fundierte Architektur für Multiagentensysteme 339

9 Interaktion verteilter Systeme 343
9.1 Modellierung von Interaktionen durch Dienstnetze 344
9.2 Korrektheit von Dienstnetzen 356
9.3 Rollenkomponenten von Dienstnetzen 363
9.4 Formale Analyse und Steuerung von Diensten 375
9.5 Dienstklassen 381

10 Koordinierung in Agententeams 385
10.1 Aufgabenbearbeitung in Delegationsnetzen 387
10.2 Rollen/Dienst-Netze und Teams 392
10.3 Koordination von Teams 401
10.4 SONAR-Agenten und Teamwork 403
10.5 SONAR-Multiagentensysteme und wohlgeformte Teamplanung . . 413

11 Formale Agentenorganisationen 419
11.1 Organisationspetrinetze und Positionen 419
11.2 Koordinierung der Organisationsprozesse 433
11.3 Organisationspositionen als Agenten 438
11.4 Multiagentensystemorganisationen 440
11.5 Konstruktion wohlorganisierter Multiagentensysteme 444

12 Sozionisches Modell reflexiver, selbstorganisierter Koordinierung 461
12.1 Reorganisation als organisationale Aktivität 461
12.2 Reorganisation durch Organisationstransformationen 464

12.3 Elementare Tranformationen 465
12.4 Selbstorganisation durch Transformationsteams 468
12.5 Organisationsmetriken 491

13 Agentensysteme als Interaktion von Organisation und Mitgliedern 497
13.1 Positionen und Organisationsmitglieder 497
13.2 Die Organisation als Plattform 500
13.3 Teamwork: Formation, Planung und Ausführung 504
13.4 Ausprägung organisationaler Strukturen 508
13.5 Vergleich von SONAR mit anderen Ansätzen 509

14 Zusammenfassung und Ausblick 513

Literaturverzeichnis 523

Index 543

1 Der Forschungsgegenstand der Sozionik

Die vorliegende Arbeit stellt eine Zusammenfassung meiner Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Sozionik dar. Sozionik ist eine junge, interdisziplinäre Forschungsdisziplin im Schnittfeld von Soziologie und Informatik, die von Thomas Malsch und anderen ins Leben gerufen und als Schwerpunktprogramm von 1999 bis 2005 von der DFG gefördert wurde (Malsch, 1996; Malsch u. a., 1998; Malsch, 2001, 2002)

Sozionik widmet sich der Modellierung künstlicher Gesellschaften, wie sie in der Informatik in Form von Multiagentensystemen (MAS) vorkommen. Dies ähnelt insofern der besonders im angelsächsischen verbreiteten Forschungsrichtung der *Social Simulation*, die soziale Phänomene in Form von Computersimulationen nachbildet. Die Modelle werden dort üblicherweise als Differentialgleichungssystem oder mittels einer ereignisorientierten Simulationssprache beschrieben (siehe dazu beispielsweise Gilbert und Conte, 1995; Gilbert und Troitzsch, 1999). Die Sozionik formuliert ihre Modelle dagegen auf Basis von Multiagentensystemen, weil das Konzept des Agenten, wie es in der verteilten künstlichen Intelligenz (VKI) verwendet wird, bereits eine Vielzahl sozialer Aspekte – wie Rollen, Interaktion, Verhandlungen oder Kooperation – beinhaltet. Zum Beginn sozionischer Forschung waren diese Aspekte jedoch nur lose mit den entsprechenden theoretischen Konzepten der Soziologie verbunden. Die Sozionik hatte sich zur Aufgabe gemacht, dieses Theoriedefizit zu beheben. Indem die verteilte künstliche Intelligenz soziale Aspekte betrachtet und die *social simulation* Agentensysteme als Simulationswerkzeug aufgreift, nähern sich die beiden Forschungsrichtungen einander an.

> "If the MAS field can be characterized as the study of societies of artificial agents, agent-based simulation can be defined as the study of artificial societies of autonomous agents." (Conte u. a., 1998)

Sozionische Forschung wirkt damit in die beiden Teildisziplinen zurück. Der Gewinn für die Informatik besteht in der Integration sozialwissenschaftlich fundierter Konzepte in die Architekturen der Multiagentensysteme, mit deren Hilfe sich die Systeme *selbstorganisierend* an sich verändernde Umweltbedingungen anpassen können. „Die moderne Gesellschaft bietet [...] ein reichhaltiges Reservoir an Vorbildern für die Modellierung von Multiagentensystemen. Dabei kann die Informatik von der Adaptivität, Robustheit, Skalierbarkeit und Reflexivität sozialer Systeme lernen und ihre Bauprinzipien in leistungsfähige Technologien umsetzen."[1]

[1] Dieses Zitat ist ebenso wie die nachfolgenden dem Antragstext zum DFG-Schwerpunktprogramm Sozionik (siehe dazu Sozionik, 1998) entnommen.

Selbstorganisation ist eine Systemeigenschaft, die nicht zuletzt mit dem *autonomous/organic computing* Ansatz von IBM oder der *dynamic system initiative* von Microsoft an breiterer Aufmerksamkeit und Bedeutung gewonnen hat. Im Rahmen der Sozionik wird Selbstorganisation speziell für Systeme betrachtet, die eine Form von sozialer Struktur besitzen und bei denen Handlungen und soziale Struktur in einem *wechselseitigen Konstitutionsverhältnis* stehen. Diese Eigenschaft der Reflexivität grenzt die Sozionik also von Ansätzen ab, die sich auf Schaltkreise, neuronale Netze, Ameisenpopulationen oder ähnliches beziehen.

Der Gewinn für die Soziologie besteht in der Erweiterung ihres Methodenschatzes um die Modellierungs- und Simulationstechniken der Informatik. Konkret hat dies zur Folge, dass Inkonsistenzen, Unklarheiten und „blinde Flecken" soziologischer Theorien allein schon durch den Versuch ihrer Modellierung aufgedeckt werden. „Umgekehrt kann die Soziologie von der Informatik profitieren, indem sie die Multiagententechnik als Simulationswerkzeug zur Überprüfung und Ausarbeitung ihrer eigenen Begriffe, Modelle und Theorien nutzt."

Besonderes Augenmerk richtet die sozionische Arbeit dabei der *Mikro/Makro-Verbindung*. Mit der Modellierung „eröffnen sich neuartige Möglichkeiten, um dynamische Wechselwirkungen zwischen Mikrophänomenen (soziales Handeln) und Makrophänomenen (gesellschaftliche Struktur) nachzubilden und experimentell durchzuspielen." Die Besonderheit der Wechselwirkungen zwischen sozialem Handeln und gesellschaftlichen Strukturen liegt in ihrer wechselseitigen Bedingtheit: So ermöglichen und leiten gesellschaftliche Strukturen einerseits das soziale Handeln der Akteure, andererseits ist es gerade das soziale Handeln, das gesellschaftliche Strukturen produziert. Soziales Handeln und gesellschaftliche Strukturen sind gleichermaßen Ursache und Wirkung in einem – eine theoretische Besonderheit, auf die ich noch ausführlich zu sprechen kommen werde.

Die Analyse des Mikro/Makro-Zusammenhangs wird in der Sozionik zudem als zentraler Ansatzpunkt für die Skalierungsproblematik gesehen, da sich zentrale Modellierungsdetails an der Schnittstelle von Mikro- und Makroprozessen befinden. Diese wechselseitige Bedingtheit ist daher in der Sozionik zentraler Ausgangspunkt theoretischer Überlegungen. „Eine der Aufgaben sozionischer Forschungsarbeiten besteht darin, Mikro-Makro-Zusammenhänge auf den unterschiedlichen Ebenen sozialer Koordination derart zu rekonstruieren, dass damit die Grundlagen für große [...] und rekursiv vernetzte Multiagentensysteme gelegt werden." Durch die Referenz auf soziologische Theorie will die Sozionik insbesondere einen Eklektizismus in der Verwendung sozialtheoretischer Konzepte vermeiden, indem sie die Entwicklung einer *sozialen Theorie der Multiagentensysteme* anstrebt.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein sozionisches Modell von Multiagentensystemen zu entwickeln, d.h. ein formales Modell, das in sozialwissenschaftlich befriedigender Weise die wechselseitige Bedingtheit zwischen Mikro- und Makrophänomenen berücksichtigt. Will man, wie oben angedeutet, speziell selbstorganisierende Multiagentensysteme entwerfen, so folgt aus der wechselseitigen Bedingtheit, dass auch die Selbstorganisation ein wechselseitiger, d.h. reflexiver Prozess ist, der von den Agenten in Form von koordinierter Interaktion erbracht wird. Aus

dieser Erkenntnis ergibt sich auch der Titel der Arbeit: *Koordinierte Selbstorganisation und selbstorganisierte Koordination*. Der erste Aspekt der koordinierten Selbstorganisation betont, dass der Prozess organisiert wird, mithin ein Makrophänomen darstellt, während der zweite Aspekt der selbstorganisierten Koordination betont, dass der Prozess von den Akteuren koordiniert wird, mithin ein Mikrophänomen darstellt. Beide Aspekte werden in dieser Arbeit gleichermaßen berücksichtigt.

Aus dieser Zielsetzung ergibt sich für uns folgende Gliederung: Im ersten Abschnitt der Arbeit wird das Konzept der Selbstorganisation im Detail betrachtet – und zwar in Kapitel 2 mit der Darstellung allgemeiner Aspekte und in Kapitel 3 speziell in Hinblick auf Multiagentensysteme. Die Darstellung geschieht vor dem Hintergrund, dass die Arbeit sich an ein sozionisch interessiertes Publikum wendet und daher zunächst eine gemeinsame konzeptionelle Basis für Soziologen und für Informatiker geschaffen werden soll.

Im zweiten Abschnitt widme ich mich den sozialwissenschaftlichen Konzepten, die für Multiagentensysteme relevant sind.[2] Um die vorhandenen Konzepte der Sozialwissenschaft nutzen zu können, ist es jedoch zunächst notwendig, sie derart aufzubereiten, dass sie anschlussfähig innerhalb der Informatik kommuniziert werden können, da es sich gezeigt hat, dass es nicht offensichtlich ist, wie Sozialtheorien angemessen auf Multiagentensysteme anzuwenden sind. „Es ist deshalb erforderlich, dass sich Informatiker und Soziologen über die Grundbegriffe künstlicher Sozialität und die darin enthaltenen theoretischen Annahmen austauschen. [...] Ein Konzept- oder Methodentransfer ist ausdrücklich anzustreben. Ziel des sozionischen Programms ist es, derartige Austauschprozesse zu begünstigen."

Im Sozionikprojekt ASKO haben wir Petrinetze als Modellierungssprache herangezogen, um die vielfältigen Konzepte, Beziehungen und Dynamiken der hier behandelten Sozialtheorie abbilden zu können. Die Vorzüge der Petrinetze im sozionischen Kontext erläutert Kapitel 4. Kapitel 5 präsentiert die im interdisziplinären Diskurs entstandenen Modelle zu Akteurstheorien, Strukturdynamiken und Organisationstheorien. Die Modelle, die sich speziell der Modellierung der Mikro/Makro-Wechselwirkungen widmen, betrachte ich gesondert in Kapitel 6.

Im dritten Abschnitt wende ich die Ergebnisse der Modellierungsarbeit auf Multiagentensysteme an und konzipiere sie als reflexive, soziale Praxisformen. Dazu betrachte ich in Zusammenarbeit in Kapitel 7 mit Roman Langer die von ihm im Rahmen unseres Nachfolgeprojekts DISPO[3] erarbeitete *Theorie sozialer Selbstorganisation*. Wie schon im zweiten Abschnitt entwickeln wir zudem eine formale, petrinetzbasierte Modellierung der Theorie. Diese Modellierung wird in Kapitel 8 verwendet, um das Konzept eines Multiagentensystems zu entwickeln, das sich unmittelbar der Reflexivität der Mikro/Makro-Verbindung stellt.

Der vierte Abschnitt entwickelt dann – aufbauend auf den sozialtheoretischen Vorüberlegungen – ein formales Modell eines Multiagentensystems – SONAR[4]

[2] Der Abschnitt ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem DFG-Projektes *ASKO*. ASKO ist ein Akronym für: *A*gieren in *s*ozialen *Ko*ntexten.

[3] DISPO ist ein Akronym für: Emergenz in dynamischen Prozessen: *Di*rigismus und *s*ymbolische *Po*litik.

[4] Akronym für *s*elbst*o*rganisierende Petri*n*etz-*Ar*chitektur.

genannt. Die Kapitel diese Abschnitts behandeln dabei die notwendigen Strukturen in der Reihenfolge ihres Abstraktionsgrades. Kapitel 9 formalisiert die Interaktion von Agenten durch den Formalismus der Dienstnetze. Kapitel 10 entwickelt ein Modell eines *Teams*, das die soziale Interaktion der Akteure rahmt. In Kapitel 11 entwickele ich das Modell der *Multiagentensystem-Organisation*, das die sozialen Strukturen zur Teambildung bereitstellt. Außerdem zeigen wir, wie sich von diesem Organisationsmodell direkt ein ausführendes Multiagentensystem generieren lässt. Kapitel 12 beschreibt die Reorganisation von Organisationen. Dieser Prozess modelliert die *Selbstorganisation*, da er von den Agenten des Systems selbst erzeugt wird. Kapitel 13 reflektiert die Unterscheidung in formale und informelle Organisation, bei der zwischen den Positionen und Rollen und ihren Inhabern getrennt wird, und zeigt, wie sich die sozialtheoretisch verbreitete Unterscheidung fruchtbar im agentenorientierten Entwurf von Softwaresystemen verwenden lässt.

Teil I

Selbstorganisation in Multiagentensystemen: State of the Art

„In der Informatik geht es genauso wenig um Computer wie in der Astronomie um Teleskope.“

E. W. Dijkstra

Überblick

In diesem Abschnitt betrachten wir den aktuellen Forschungsstand zur Selbstorganisation in Multiagentensystemen. Wir beginnen zunächst in Kapitel 2 mit einer Darstellung von Konzepten aus dem Umfeld der Selbstorganisation. Dies geschieht mit der Intention, Begriffe, die teilweise schon zur alltäglichen „Folklore“ der Sozionik gehören, zunächst einmal zusammenzutragen und zu einen kohärenten Kontext zu verbinden. Daher betrachten wir Konzepte wie das des Chaos, der Nichtlinearität, der Symmetriebrechung und der Attraktoren. Wir betrachten Maschinenmodelle und ihre Selbstbezüglichkeit am Beispiel so bekannter Systeme wie Turing-Maschinen, Zellulare Automaten, Lindenmayer-Systeme, neuronale Netzwerke, evolutionäre Algorithmen und Ameisenkolonien. Auch nähern wir uns dem Begriff der Emergenz und versuchen das Konzept der Ordnung klarer zu fassen, indem wir es im Kontext der Kolmogorov Komplexität, der Informationstheorie nach Shannon und der algorithmischen Komplexitätstheorie beleuchten. Wir beenden das Kapitel mit einer Darstellung von Selbstordnungsprinzipien der Synergetik, wie beispielsweise dem Versklavungsprinzip.

Kapitel 3 widmet sich der Selbstorganisation in Agentensystemen, die sich hier in Form von Koordinierungsphänomenen äußert. Wir skizzieren Multiagentensysteme zunächst anhand üblicher Perspektiven, die Agentensysteme entweder als System von Agenten, als Interaktionsgruppe, als Organisationsform oder sogar als Sozialität auffassen. Wir erläutern die elementaren Formen der Koordination, nämlich Kooperation und Konkurrenz. Kooperation äußert sich als verteiltes Problemlösen, Konkurrenz dagegen in Form von Verhandlungen. Wir betrachten normative Agenten, die sich von Institutionen in ihrer Handlungswahl leiten lassen. Als Gegensatz zur individualistischen Perspektive betrachten wir Multiagentensysteme auch als künstliche Organisationen, die der Rahmung und Strukturierung ihrer Mitglieder dienen. Dieser Aspekt ist insbesondere für die agentenorientierte Softwareentwicklung relevant, da Organisationen den Entwickler in die Lage versetzen, globale, agentenübergreifende Eigenschaften zu spezifizieren. Als Abschluss betrachten wir, inwiefern Agentensysteme Gegenstand sozialer Theorien sein können. Hierbei betrachten wir das Wechselspiel individueller Planung im organisationalen Kontext mit Institutionalisierungsprozessen.

2 Emergenz, Selbstorganisation und Komplexität

Selbstorganisation ist eine disziplinübergreifende Forschungsrichtung, die sich mit Systemen beschäftigt, die ohne externen Eingriff ordnungsbildend wirken.

> "Intuitively, self-organisation refers to the fact that a system's structure or organisation appears without explicit control or constraints from outside the system. In other words, the organisation is intrinsic to the self-organising system and results from internal constraints or mechanisms, due to local interactions between its components." (Serugendo u. a., 2004, S. 2)

Ordnungsbildung wird in so verschiedenen Bereichen wie der Laserphysik, der Thermodynamik, der Evolutionsbiologie, der Meterologie, der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Soziologie thematisiert. Die Grundannahmen und Konzepte der Selbstorganisation unterscheiden sich so elementar von den althergebrachten, dass Paslack (1991) von einem Paradigmenwechsel spricht:

> „Die Antworten, die auf diese und ähnliche Fragen gefunden wurden, gingen freilich über das spezielle Frageinteresse hinaus und begründeten eine völlig neue Sicht der Natur". (Paslack, 1991, S. 1)

Die Forschungsrichtung der selbstorganisierenden Systeme begann sich in den 60er Jahren zu etablieren. Dieser doch recht späte „Durchbruch" des Selbstorganisationskonzeptes in der Wissenschaft liegt nicht zuletzt an dem Erfolg des mechanistischen Weltbildes in Kombination mit der mathematisch handhabbaren Theorie linearer Systeme, die eng mit der Differentialrechnung verbunden ist. Dieser Erfolg verführte dazu, Probleme so lange wie nur irgend möglich (teils auch noch länger) als linear zu klassifizieren, was den Blick auf die nichtlinearen Effekte versperrte.

Der Clou der selbstorganisierenden Systeme ist ihre Dynamik. Sie sind damit – überraschenderweise – notwendigerweise *instabile* Systeme. Die Strukturiertheit und Flexibilität dieser Systeme geschieht aber nicht trotz, sondern wegen ihrer Dynamik. Wir können diese Quintenssenz folgendermaßen formulieren: Nur wandlungsfähige Systeme laufen stabil und nur instabile Systeme sind wandlungsfähig.

Die Beschreibung selbstorganisierender Systeme wartet mit einer Vielzahl neuer Konzepte auf: Selbstähnlichkeit, Fraktalität, Chaos, Nichtlinearität. Diese Begriffe haben mittlerweile Eingang in den allgemeinen Diskurs gefunden, wenn auch zum Teil in ihrer popularisierten Variante. Im folgenden wollen wir klären, welche Phänomene sich hinter diesen Begriffen verbergen.

2.1 Systeme und Systemdynamik

Die Systemtheorie ist eine fächerübergreifende Disziplin, die sich der mathematischen Modellierung und Analyse von Systemen widmet. Systeme bestehen aus Elementen und Beziehungen zwischen ihnen. Elemente sind meist nicht weiter strukturierte Gebilde. Ein besonderer Fall liegt vor, wenn wir die Elemente wiederum als Systeme konzipieren und eine rekursive Systemstruktur entsteht. Die Beziehungen können sowohl statischer als auch dynamischer Natur sein. Statische Relationen betreffen die Anordnung der Systemelemente zueinander, dynamische betreffen die Interaktionsbeziehungen zwischen den Elementen.

Als Teildisziplin der Systemtheorie gilt die Theorie der Nachrichtenübertragung nach Claude Shannon (1916-2001) und die Kybernetik nach Norbert Wiener (1894-1964). Im Rahmen der Systemtheorie werden die dynamischen Beziehung als Signale bezeichnet. Heinz von Foerster (1911-2002) gilt als der Begründer der zweiten Phase der Kybernetik. Die zweite Phase betrachtet den Aspekt der Selbstreferentialität von Systemen, d.h. Systeme verweisen mit ihrer Dynamik auf sich selbst zurück. Foerster behandelte nicht triviale Maschinen[1], d.h. Systeme, die eine innere Struktur aufweisen. Diese innere Struktur ermöglicht es, Signale autonom, d.h. nach eigenen Gesetzen zu verarbeiten. Man spricht von einer operationellen Geschlossenheit, da nur Operationen, die Bestandteil des Systems sind, auf das System einwirken können.

Foerster betrachtete auch, wie umgebungsoffene Systeme Ordnung generieren, indem sie Energie/Information aus der Umgebung nutzen, um interne Strukturen aufzubauen. Solche Ordnungsbildungsprozesse sind nur fernab des thermodynamischen Gleichgewichtszustandes möglich. In den frühen 60er untersuchte der Chemiker Ilya Prigogine Ordnungsbildung bei irreversiblen Prozesse. Die untersuchten Strukturen zeigten Effekte der *Pfadabhängigkeit*, d.h. nicht der momentane Zustand bestimmt die weitere Entwicklung, sondern die gesamte Historie (der Entwicklungspfad). In ähnlicher Art und Weise gelang es Manfred Eigens mit seiner Theorie der autokatalytischen Hyperzyklen, biochemische Prozesse (die Genese lebendiger Materie) auf die Selektionsprozesse der molekularen Ebene zu reduzieren (siehe auch Eigen und Schuster, 1979). Autokatalytischer Prozesse verketten sich zu einem Hyperzyklus, der es erlaubt, Reproduktionsfehler zu korrigieren. Analog zur DNA sind Hyperzyklen somit in der Lage, Information zu kodieren und auch weiterzugeben. Analog zu Gattungen konkurrieren verschiedene Hyperzyklen um die zur Reproduktion benötigten Aminosäuren und steuern so den Evolutionsprozess.

Eng mit der Kybernetik ist Theorie der Automaten nach John von Neumann (1903-1957) und Alan Turing (1912-1954) verbunden. Weiter Bezüge ergeben sich zur Theorie berechenbarer Funktionen nach Alonzo Church (1903-1995), zur Theorie der formalen Sprachen nach Noam Chomsky (1928) sowie zur Komplexitätstheorie nach Kolmogorov (1903-1987). Für die Sozialwissenschaften gelten

[1] Unter einer trivialen Maschine versteht Foerster eine Maschine, die eine direkte Kopplung von Input zu Output besitzt, während nicht-triviale einen Zustand besitzt, der es erlaubt, auf den gleichen Input in zustandsabhängig zu reagieren. Alle heutigen Automatenmodelle (wie endliche Automaten, Kellerautomaten, Turing-Maschinen usw.) fallen unter den Begriff der nicht-trivialen Maschine.

Talcott Parsons (1902-1979) und Niklas Luhmann (1927-1998) als Wegbereiter des systemischen Denkens. Talcott Parsons gilt als Begründer der handlungstheoretischen, Niklas Luhmann als Begründer der kommunikationstheoretischen Variante der soziologischen Systemtheorie.

Die in jüngster Zeit betrachteten Systeme besitzen eine Reihe gemeinsamer Attribute, die kennzeichnend für komplexe, sich selbst organisierende Systeme sind:

1. Offenheit: Komplexe Systeme sind typischerweise *offene Systeme*, d.h. sie tauschen Materie, Energie, Information usw. mit ihrer Umgebung aus. Nur unter diesen Annahmen besitzen sie die Fähigkeit zur Strukturbildung und Selbstorganisation.[2] Insbesondere die Lernfähigkeit biologischer Systeme, sei es individuell oder evolutionär, beruht auf dieser Grundlage.

2. Nichtlinearität: Die Wirkungszusammenhänge der Systemkomponenten sind im allgemeinen nichtlinear. Weist das Systeme mehre Häufungspunkte oder Attraktorzustände auf, so hängt es von den Anfangswerten ab, welcher angestrebt wird. Nichtlineare Systeme reagieren daher schon auf kleine Störungen, so dass ein System, das bei einem Parameterwert einen Attraktor anstrebt, schon bei einer kleinen Variation des Parameters einen völlig anderen Wert anstrebt kann, zwischen mehreren Werten oszilliert oder gar chaotisches Verhalten zeigt.

3. Pfadabhängigkeit: Komplexe Systeme reagieren nicht nur in Abhängigkeit vom aktuellen Zustand, sondern auch von der Vorgeschichte des Systems – dem Entwicklungspfad. Das System besitzt also einen internen Zustand. Zustandsbehaftete Systeme sind nicht mehr direkt beeinflussbar, da der Zustand die Reaktion vom Signal entkoppelt. Dies kommt im Konzept der *operationalen Geschlossenheit* zum Ausdruck, das besagt, dass Systeme, die Umweltreize nach eigenen Regeln verarbeiten, in erster Linie nur durch sich selbst beeinflusst werden und nur in zweiter Linie durch die Umwelt.

   Zustandsänderungen erlauben es einem System, auf seine Umwelt zu reagieren, sich zu adaptieren. Die dabei ausgebildeten internen Strukturen des Systems dienen u.a. der *Komplexitätsreduktion* in der Reaktion auf die Umwelt.

4. Emergenz: Komplexe Systeme besitzen emergente Eigenschaften, d.h. Eigenschaften, die sich nicht auf Teileigenschaften reduzieren lassen. Bemerkenswerterweise ist eine Vielzahl der Systeme (z.B. Fischschwärme oder neuronale Netzwerke) ziemlich simpel aufgebaut, d.h. die einzelnen Elemente besitzen kaum Struktur und die Wechselwirkungen sind lediglich lokal.

5. Autopoiese: Autopoiese ist die Fähigkeit eines Systems, seine Bestandteile selbst wieder hervorzubringen. Das beinhaltet, dass die Begrenzung und

[2] Offene Systeme können sich fernab von einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand befinden. Dies ist wichtig, denn im Gleichgewichtszustand verhindern die Grundsätze der Thermodynamik, hier der 2. Haupsatz, eine Komplexitätssteigerung.

der Erhalt der Systeme als Leistung des Systems selbst geschieht. Diese Prozesse sind systemintern und werden nur vom System selbst kontrolliert.

Diese Eigenschaften sind einerseits konzeptionell und phänomenologisch höchst bemerkenswert, andererseits steigt durch sie der Aufwand, diese System analytisch zu durchdringen, enorm.

2.2 Chaos und Nichtlinearität

Im Rahmen der Chaostheorie wird der Effekt nichtlinearer Kopplung studiert. Nichtlineare Systeme reagieren teilweise extrem bezüglich minimaler Schwankung der Ausgangswerte, frei nach dem Motto: kleiner Aufwand, große Wirkung. Die Betrachtung nichtlinearer Effekte – wie wir sie für Klimasysteme, bei Schwarmverhalten, Zellwachstum oder Ameisenstaaten vorfinden – hat gezeigt, dass selbst sehr einfache Kopplungsmechanismen komplexes Verhalten generieren können (vgl. dazu Mainzer, 1999).

Diese Eigenschaft ist das Besondere an komplexen oder chaotischen Systemen: Sogar wenn die Anzahl der Parameter klein ist und ihre Wechselwirkungsformen einfachen Gesetzen gehorcht, kann das Gesamtverhalten, d.h. die Systemdynamik, sehr komplex sein.

Damit ist in diesem Zusammenhang auch die Bedeutung des Wortes *Chaos* klar. Chaos bedeutet in diesem Fall nicht, dass sich komplexe Systemdynamiken der Analyse entziehen würden, denn schließlich handelt es sich um streng deterministische Systeme. Chaotische Systeme erfüllen aufgrund ihres Determinismus das starke Kausalitätsprinzip („Gleiche Ursachen haben gleiche Wirkungen“), aber aufgrund nichtlinearer Effekte nicht das schwache Kausalitätsprinzip („Kleine Veränderungen haben kleine Wirkungen“). So können sich Erkenntnisse über ein System schon bei kleinen Veränderungen der Randbedingungen in ihr Gegenteil verkehren. Daher ist es im praktischer Hinsicht schwierig, dass Verhalten chaotischer Systeme zu prognostizieren, da ihre Dynamik empfindlich von den Anfangswerten abhängt und für alle realen Probleme die Anfangswerte stets nur mit einer endlichen Genauigkeit ermittelt werden können.

Eine globale Analyse nichtlinearer Systeme ist allerdings auch für unscharfe Anfangswerte möglich, beispielsweise indem man globale Eigenschaften des Systems bestimmt. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung von Attraktoren. Attraktoren sind Systemzustände, die vom System angestrebt werden, und dies weitesgehend unabhängig davon, mit welchen Anfangswerten das System gestartet wird. Oftmals ist eine Analyse der Attraktoren ausreichend, um die Systemdynamik zu verstehen.

Wir betrachten im folgenden die Konzepte der Linearität und der Attraktoren.

2.2.1 Linearität

Ein System ist linear, wenn sich seine Dynamik als Kombination der Dynamik seiner Teile charakterisieren lässt. Lineare Systeme sind somit ein Paradebeispiel für den reduktionistischen Ansatz.

In der Mathematik äußert sich Linearität beispielsweise in der Beschreibung von Systemen mit Hilfe von Differentialgleichungen. Die lineare Differentialgleichung für die Funktion $y(x)$ lautet in Operatorschreibweise $L(y)$:

$$L(y) = \sum_{j=0}^{n} p_j(x) \frac{\mathrm{d}^j y(x)}{\mathrm{d}x^j} = r(x)$$

Die Koeffizientenfunktionen $p_j(x)$ sind dabei stetige Funktionen von x. Der Term $r(x)$ heißt Störfunktion. Die lineare Differentialgleichung heißt *homogen*, falls $r(x) = 0$ und ansonsten *inhomogen*.

Die Bezeichnung *linear* bezieht sich auf die Eigenschaften des Operators L. Für zwei n-mal stetig differenzierbare Funktionen $u_1(x)$ und $u_2(x)$ gilt nämlich das *Superpositionsprinzip*:

$$\begin{aligned} L(u_1 + u_2) &= L(u_1) + L(u_2) \\ L(au_1) &= aL(u_1) \end{aligned}$$

Für physikalische Probleme modelliert die Abbildung y die Konfiguration (bestehend aus Ort und Impuls) eines Teilchens in Abhängigkeit der Zeit. Die Transformation L beschreibt somit die zeitliche Entwicklung der Konfiguration durch den Raum aller Orts-/Impulskonfigurationen, den *Phasenraum*.

Beispiel Die lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}x^2} + 2\gamma \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} + \rho^2 y = 0 \tag{2.1}$$

besitzt die Erzeugenden von der Form $y(x) = e^{kx}$. Eingesetzt in die Differentialgleichung ergibt sich:

$$k^2 e^{kx} + 2\gamma k e^{kx} + \rho^2 e^{kx} = (k^2 + 2\gamma k + \rho^2) e^{kx} = 0$$

Da $e^{kx} \neq 0$ gilt, muss das charakteristische Polynom verschwinden, d.h. $P(k) = k^2 + 2\gamma k + \rho^2 = 0$. Es ergeben sich die Lösungen $k_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \rho^2}$. Das Vorzeichen des Radikanten entscheidet über die Form der Lösung.

1. Falls $\gamma^2 - \rho^2 < 0$ gilt, so sind beide Lösungen $k_{1,2}$ imaginär. Mit $\omega^2 := (\rho^2 - \gamma^2)$ folgt $k_{1,2} = -\gamma \pm i\omega$:

$$y(x) = c_1 e^{-\gamma x} e^{i\omega x} + c_2 e^{-\gamma x} e^{-i\omega x} = e^{-\gamma x}(c_3 \sin(\omega x) + c_4 \cos(\omega x))$$

2. Falls $\gamma^2 - \rho^2 = 0$ gilt, so ist $k = -\gamma$ eine zweifache Lösung, d.h. eine Lösung mit der Vielfachheit Zwei.

$$y(x) = c_1 e^{-\gamma x} + c_2 x e^{-\gamma x}$$

3. Falls $\gamma^2 - \rho^2 > 0$ gilt, so sind beide Lösungen $k_{1,2}$ reell.

$$y(x) = c_1 e^{k_1 x} + c_2 e^{k_2 x}$$

Die beiden Konstanten ergeben sich aus den Randbedingungen für $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}$ und y, meist $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}(0)$ und $y(0)$. ◇

Die Lösungen einer homogenen Differentialgleichung $L(y)$ bilden einen n-dimensionalen Vektorraum. Jede Lösung y ist somit eine Linearkombination $y = a_1 y_1(x) + \cdots + a_n y_n(x)$ der Basis $y_1(x), \ldots, y_n(x)$. Die Dynamik eines Systems $L(y)$ ergibt sich somit direkt als Linearkombination der der Einzeldynamiken $L(y_1)$, …, $L(y_n)$:

$$L(y) = L(a_1 y_1(x) + \cdots + a_n y_n(x)) = a_1 L(y_x) + \cdots a_n L(y_n)$$

Aufgrund dieser Linearität ist die komplette Dynamik bereits durch ihre n Erzeuger $y_1(x), \ldots, y_n(x)$ vollständig charakterisiert.

Aus der Linearitätseigenschaft erkennt man sofort, dass die Dynamik sich kaum verändert, wenn wir die Anfangsbedingungen verändern, denn für einen Eingangswert y, denn wir um einen kleinen Wert δ variieren, erhalten wir $L(y+\delta) = L(y) + L(\delta)$, d.h. die Veränderung $L(y+\delta) - L(y) = L(\delta)$ ist nur abhängig von δ, aber nicht von y selbst. Das System verändert sein Verhalten stetig im Verhältnis zu Änderung der Eingangswerte.

Für nichtlineare Systeme gilt diese Form der Stetigkeit nicht mehr, so dass eine minimale Variation der Eingangsgröße eine dominante Wirkung auf die Dynamik des Systems besitzen kann. Dieser Zusammenhang hat zur Konsequenz, dass jede Ungenauigkeit in der Erfassung der Randwerte große Auswirkungen auf die Dynamik hat.

2.2.2 Nichtlinearität

Nichtlineare Systeme werden auch als „chaotische Systeme“ bezeichnet. Der Begriff „Chaos“ ist insofern irreführend, als dass die beschriebenen Systeme exakt beschrieben sind und eine wohldefinierte, deterministische Entwicklung besitzen. Die Entwicklung der Systeme lässt sich jedoch nicht mehr so einfach verstehen wie im linearen Fall.

Nichtlinearität ist anekdotisch mit der Arbeit Edward Lorenz' verbunden, der ein Differentialgleichungssystem zur Beschreibung eines einfachen Klimamodells behandelte und dabei die kritische die Sensitivität von Systemen in Bezug auf Störungen entdeckte. Das Lorenz-System soll die Zustände in der Erdatmosphäre zum Zweck einer Langzeitvorhersage modellieren. Bei dem Lorenz-System handelt es sich um die Lösung eines Systems von drei gekoppelten, nichtlinearen Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) \\ \dot{y} &= x(b - z) - y \\ \dot{z} &= xy - cz \end{aligned}$$

Die Differentialgleichung wurde dabei numerisch mit Hilfe eines Computers gelöst. Als Lorenz einen Abschnitt seiner Berechnungen wiederholen wollte, gab er einen bereits zuvor berechneten Zwischenwert als Startwert ein. Auf dem Kontrollausdruck, von dem er die Werte abschrieb, waren die Daten jedoch nur

in verkürzter Genauigkeit ausgedruckt worden, so dass das Programm nicht auf den exakten Werten, sondern auf gerundeten operierte. Zu seiner großen Überraschung stellte Lorenz fest, dass der zweite, auf den gerundeten Werten operierende Simulationslauf sich fundamental von dem ersten unterschied. Lorenz hatte erwartet, dass eine kleine Veränderung der Eingangsgrößen auch nur eine kleine Wirkung in der Berechnung nach sich ziehen würde. Stattdessen zeigte sich eine starke Sensitivität der Dynamik in Bezug auf die Anfangswerte, die sehr schnell die eigentliche Dynamik dominiert.

Das Verhalten solcher Systeme wird oft als „chaotisch“ bezeichnet, man sprich von Chaostheorien. Dabei ist zu bemerken, dass es sich bei den betrachteten Systemen dennoch um streng kausal determinierte Gebilde mit exakt voraussagbarem Verhalten handelt. Die Besonderheit dieser Systeme liegt darin, wie sie auf kleine Veränderungen der Anfangsbedingungen reagieren.

Betrachten wir zunächst ein System (z.B. das Wettersystem), dessen zeitliche Dynamik durch einen Variablensatz $x(t)$ (z.B. Temperatur, Luftdruck, Strömung) bestimmt wird. Geben wir für $t = 0$ einen konkreten Startwert $x(0) = x_1$ vor, so ist damit die Dynamik festgelegt. Wie verändern sich die Dynamik, wenn wir den Startwert x_1 um einen im Verhältnis dazu sehr kleinen Wert δ ändern? Für lineare Systeme bleiben beide Dynamiken nah bei einander. Im Gegensatz dazu reagieren nichtlineare Systeme stark auf eine Variation der Randwerte. Die Dynamiken entfernen sich innerhalb kürzester Zeit voneinander.

Das chaotische Verhalten ist somit kein prinzipielles, sondern ein praktisches Problem. Da der Anfangswert eines realen Systems stets nur mit begrenzter Genauigkeit bekannt sein kann, führt die Variationssensitivität zu – zumindest lokal – nicht mehr voraussagbarem Verhalten. Diese Sensitivität wird auch oft als *Schmetterlingseffekt* bezeichnet. Plakativ wird formuliert, dass die vom Flügelschlag eines Schmetterlings verursachte Luftbewegung ausreicht, um einen Sturm zu entfachen.[3] Dies soll anschaulich machen, dass im atmosphärischen Strömungsbild kleine Ursachen große Auswirkung besitzen.

2.2.3 Symmetriebrechung: Kritische Punkte und Bifurkation

Symmetriebrechung ist ein zentraler Mechanismus, der zur Ordnungsbildung führt. Symmetriebrechung beschreibt dabei den spontanen Übergang von einem symmetrischen Zustand, dem Bifurkationspunkt, in einen Zustand, in dem die Symmetrie aufgehoben wird. Spontane Symmetriebrechung wird im allgemeinen durch die Veränderung eines Parameters in einem nichtlinearen System erzielt. Meist existieren dabei verschiedene Alternativen, die Symmetrie zu brechen. Unter einer Bifurkation versteht man eine qualitative Zustandsänderung in nichtlinearen Systemen. Der Begriff der Bifurkation (auch: Verzweigung) wurde von Henri Poincaré eingeführt. Nichtlineare Systeme, deren Verhalten von einem

[3] In einigen populärwissenschaftliche Darstellungen finden sich die Argumentation, dass aus diesem Grunde Prognosen (wie die Wettervorhersage) unmöglich sind. Dabei wird vollständig außer acht gelassen, dass für diese Systeme sehr wohl statistische Effekte eine Rolle spielen, denn es wird nicht die chaotische Dynamik eines Teilchens betrachtet, sondern die Dynamik eines Ensembles. Eine Behandlung der Ensembledynamik kann auch im Fall nichtlinearer Systemen möglich sein.

Parameter abhängt, können bei einer Änderung des Parameters ihr Verhalten plötzlich ändern. Am Bifurkationspunkt reichen minimale Fluktuationen (z.B. thermisches Rauschen) aus, um das System kippen zu lassen. In welchen Zustand das System dabei kippt, ist dabei aufgrund nichtlinearer Effekte praktisch nicht vorherzusagen.

Der überdämpfte Oszillator

Die spontane Symmetriebrechung und das Konzept der Bifurkation können anhand des einfachen Beispiels des überdämpften, anharmonischen Oszillators illustriert werden.

Für die Bewegung eines Teilchens der Masse m unter der äußeren Kraft F_0 gilt die Newtonsche Gleichung: $m\ddot{q} = F_0$. In vielen praktischen Problemstellungen kann die Kraft F_0 durch das Potential $V(q)$ des Teilchens dargestellt werden. Das mit der Kraft verbundene Potential $V(q)$ ist durch die Gleichung $F(q) = -\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}q}$ charakterisiert:

$$m\ddot{q} + \frac{\mathrm{d}V(q)}{\mathrm{d}q} = 0$$

Solche Systeme heißen konservativ. In ihnen gilt die Energieerhaltung. Dies sieht man, indem man die Gleichung mit $\dot{q}$ multipliziert:

$$m\ddot{q}\dot{q} + \frac{\mathrm{d}V(q)}{\mathrm{d}q}\dot{q} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m}{2}\dot{q}^2 + V(q)\right) = 0$$

Da das Teilchen nicht in Ruhe ist, gilt $\dot{q} \neq 0$, woraus folgt:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{m}{2}\dot{q}^2 + V(q)\right) = 0$$

Hieraus folgt insbesondere, dass $E = \frac{m}{2}\dot{q}^2 + V(q)$ (physikalisch: die Energie) eine Erhaltungsgröße ist. Konservative Systeme besitzen ein konstantes Phasenraumvolumen (Satz von Liouville).

Falls $m \ll \gamma$ gilt, wird die Bewegungsgleichung als stark überdämpft bezeichnet. In diesem Fall ist der Term $m\ddot{q}$ zu vernachlässigen. Durch die Veränderung des Zeitmaßstabes in Form von $t = \gamma t'$ kann der Parameter γ eliminiert werden und die Beziehung vereinfacht sich zu:

$$\dot{q} + \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}q} = 0$$

Die Kraft F_0 möge sich aus einem antreibenden Anteil F und einem Reibungsanteil proportional zur Geschwindigkeit v zusammensetzen, d.h. $F_0 = F - \gamma v$.

$$m\ddot{q} + \gamma\dot{q} + \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}q} = 0$$

Speziell für den harmonischen Oszillator ist F proportional zur Auslenkung aus der Gleichgewichtslage, d.h. $F(q) = -kq$. Das Potential ergibt sich in der Form:

$$V(q) = \frac{1}{2}kq^2 \tag{2.2}$$

Der Bezugpunkt kann willkürlich bestimmt werden. Hier wurde er zu $V(0) = 0$ bestimmt. Bedingt durch die Form des Potentials (vgl. Abb. 2.1) befindet sich das Teilchen in einer stabilen Position, da es stets in die Gleichgewichtslage bei $q = 0$ zurückkehrt.

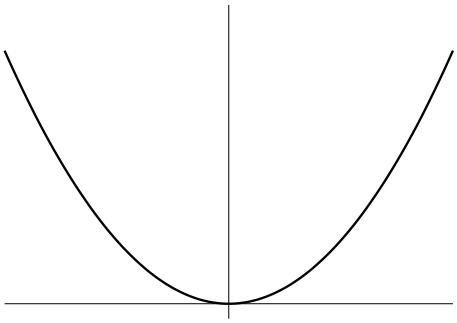


Abbildung 2.1: Das Potential $V(q) = \frac{1}{2}kq^2$ für $k > 0$

Für den anharmonischen Oszillator kommt zum linearen Term kq ein zusätzlicher kubischer hinzu, d.h. $F(q) = -kq - lq^3$. Wir nehmen im folgenden an, dass l positiv ist. Für den anharmonischen Oszillator ergibt sich das Potential in der Form:

$$V(q) = \frac{1}{2}kq^2 + \frac{1}{4}lq^4 \tag{2.3}$$

Das Potential ist also – wie im harmonischen Fall auch – absolut symmetrisch bezüglich der Koordinaten q.

Betrachten man den stark überdämpften Fall ($m \ll \gamma$) und verändert den Zeitmaßstab, um γ zu eliminieren, so vereinfacht sich die Bewegungsgleichung $m\ddot{q} + \gamma\dot{q} + \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}q} = 0$ zu:

$$\dot{q} = -kq - lq^3$$

In Abhängigkeit des Vorzeichens von k ergeben sich zwei qualitativ unterschiedliche Potentialkurven $V(q) = \frac{1}{2}kq^2 + \frac{1}{4}lq^4$ mit unterschiedlichen Nullstellen für q, jenachdem, ob $k > 0$ oder $k < 0$ gilt. Gilt $k > 0$, so ist $q = 0$ der stabile Punkt. Gilt $k < 0$, so liegen drei Lösungen vor. Dabei ist $q = 0$ ein instabiler Punkt und $q_{1,2} = \pm\sqrt{|k|/l}$ sind stabile.

Abbildung 2.2 illustriert $V(q)$ für verschiedene k. Die Minima werden immer ausgeprägter, je weiter k ins Negative wächst. Beim Übergang von $k > 0$ zu $k < 0$ wird somit die zuvor stabile Lage bei $q = 0$ instabil.

Somit ist k ein Parameter, der die Selbstorganisation aktivieren und steuern kann. Eine winzige Störung reicht aus, um das System entweder in der Lage $q = q_1$ oder in der Lage $q = q_2 = -q_1$ zu stabilisieren. Es findet also durch die Variation von k eine spontane Symmetriebrechung – in einem ansonsten absolut symmetrischen System – statt. Dieser Wechsel von „stabiler Zustand $q = 0$“ in die Aufspaltung in zwei Zustände „instabiler Zustand ($q = 0$)“ und „stabiler Zustand ($q = q_{1,2}$)“ wird als Bifurkation bezeichnet.

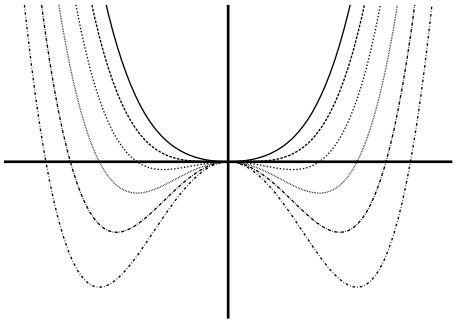


Abbildung 2.2: $V(q) = \frac{1}{2}kq^2 + \frac{1}{4}lq^4$ für verschiedene negative Werte von k

Die Verhulst-Dynamik

Ein weiteres bekanntes Beispiel zur Bifurkation ist die Verhulst-Dynamik, die eine Populationsentwicklung modelliert:

$$x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$$

Hierbei ist x_n eine Zahl zwischen 0 und 1. Sie repräsentiert die relative Größe der Population im Jahr n. Die Zahl x_0 steht also für die Startpopulation (im Jahr 0). Der Parameter r ist immer eine positive Zahl, sie gibt die kombinierte Auswirkung von Vermehrung und Verhungern wieder.

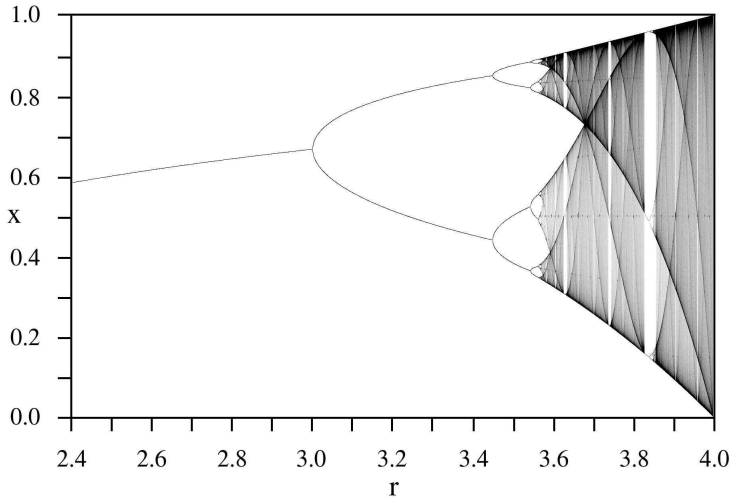


Abbildung 2.3: Bifurkationsdiagramm der logistischen Gleichung

Wir betrachten die Entwicklung von x_n bei verschiedenen Werten von r für große Werte von n. Trägt man die Häufungspunkte der Folge gegen den Parameter r auf so erhält man das Bifurkationsdiagramm der logistischen Gleichung, auch Feigenbaum-Diagramm genannt (vgl. Abb. 2.3). Es zeigt sich, dass das Verhalten nicht vom Anfangswert abhängt, sondern nur von r selbst: Für $0 \leq r < 1$ stirbt die Population, für $1 \leq r < 2$ nähert sich die Population

monoton einem Grenzwert an, für $2 \leq r < 3$ erfolgt die Annäherung oszillierend um den Grenzwert herum, für $3 \leq r < 1 + \sqrt{6}$ wechselt die Folge zwischen zwei Häufungspunkten. Ab $r = 3,57...$ beginnt das Chaos, das dadurch gekennzeichnet ist, dass Perioden nicht mehr zu erkennen sind und kleine Änderungen des Anfangswertes in unterschiedlichsten Folgewerten resultieren.

2.2.4 Trajektorien

Systeme, die sich durch lineare Differentialgleichungen beschreiben lassen, besitzen die Eigenschaft, dass sie auf Störungen linear reagieren. Interpretiert man u als das eigentliche Signal und v als Störung, so folgt aus der Linearität $L(u + v) = L(u) + L(v)$, dass sich die Dynamik relativ zu u um $L(u + v) - L(u) = L(v)$ verändert, d.h. genau um die Transformation der Störung. Ist die Störung v im Verhältnis zum eigentlichen Signal u klein, so ist auch die Auswirkung auf die Transformation $L(u + v)$ klein im Verhältnis zu $L(u)$.

Betrachten wir ein System, das durch die Größe q charakterisiert wird. Die Dynamik eines Systems ist die zeitliche Entwicklung der das System charakterisierenden Größen, also $q(t)$. Hierbei bezeichnet t die Zeit, deren Struktur meist mit den reellen Zahlen identifiziert wird. Zur Dynamik gehört neben der Zeitabhängigkeit von q auch noch die relative Veränderung von q (mit $\dot{q}(t)$ bezeichnet) und die Geschwindigkeit der relativen Veränderung (mit $\ddot{q}(t)$ bezeichnet).

Eine grundlegende Eigenschaft der Physik mechanischer Systeme ist es, dass diese (bis auf die Anfangsbedingungen) komplett durch Ort $q(t)$ und Geschwindigkeit $\dot{q}(t)$ charakterisiert sind.

In der Newtonschen Mechanik bewegt sich ein Teilchen der Masse m unter der äußeren Kraft F_0 gemäß der Newtonschen $m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = F_0$. Wir betrachten den einfachen Fall eines Kraftfeldes, das der Auslenkung proportional entgegengesetzt ist, das sogenannte „lineare Pendel“. Berücksichtigt man, dass die Geschwindigkeit v die erste Ableitung der Ortskoordinaten q bzgl. der Zeit t ist, d.h. $v = \dot{q} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$, so ergibt sich:

$$m\ddot{q} = -kq \qquad \text{bzw.} \qquad \ddot{q} = -\omega_0^2 q \quad \text{mit} \quad \omega_0^2 = k/m \tag{2.4}$$

Als Lösung dieser linearen Differentialgleichung erhalten wir

$$q(t) = a\sin(\omega_0 t + \phi).$$

Die beiden Konstanten a (die Amplitude) und ϕ (die Phase) können frei gewählt werden. Die beiden Konstanten generieren eine Systemklasse. Alle System dieser Klasse besitzen die gleiche Form, eine Schwingung. In diesem Beispiel ist es also so, dass die Systemparameter auf die grundsätzliche Dynamik keine Auswirkung haben. Dies ist eine typische Eigenschaft linearer Systeme, während nichtlineare Systeme kritisch auf die Anfangsbedingungen reagieren.

Die durch die Anfangswerte (auch: Randbedingungen) generierte Systemklasse kann man sich durch ihre Trajektorien veranschaulichen. Die für mechanische System relevanten Größen Ort q und Geschwindigkeit $\dot{q}$ bilden den sogenannten Phasenraum. Eine Phasenbahn (Trajektorie im Phasenraum) erhält man, indem

man die parametrisierte Kurve $(q(t), \dot{q}(t))$ für alle Werte für t betrachtet. Für das Beispiel des linearen Pendels gilt:

$$\dot{q}(t) = a\omega_0 \cos(\omega_0 t + \phi)$$

Der Phasenraum ist in Abbildung 2.4 angedeutet. Jede Trajektorie im Phasenraum $(q(t), \dot{q}(t))$ besitzt die Form eine Ellipse, da zwischen dem Ort $q(t)$ und der Geschwindigkeit $\dot{q}(t)$ folgende Abhängigkeit ergibt:

$$\frac{q^2(t)}{a^2} + \frac{\dot{q}^2(t)}{\omega_0^2 a^2} = 1$$

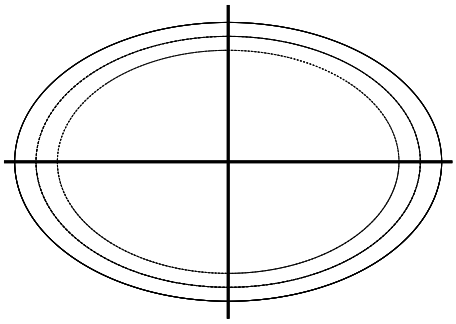


Abbildung 2.4: Phasenraum des ungedämpften Pendels

Die Bahnen sind für die freie Schwingung geschlossene Kurven, d.h. ohne Reibung schwingt das Pendel bis in alle Ewigkeit weiter. Betrachtet man das gleiche System mit Dämpfung, so ist (2.4) ein geschwindigkeitsabhängiger Reibungsterm hinzuzufügen:

$$\ddot{q} = -2\gamma\dot{q} - \omega_0^2 q \tag{2.5}$$

Wenn wir annehmen, dass die Reibung klein ist: $\gamma < \omega_0$, dann ergeben sich – wie bereits für (2.1) analysiert – die beiden Lösungen $c_i e^{k_i}$ mit $k_{1,2} = -\gamma \pm i\omega$, wobei wir $\omega^2 := (\omega_0^2 - \gamma^2)$ gesetzt haben. Die allgemeine Lösung hat damit die Form:

$$q(t) = e^{-\gamma t}(c_1 \sin(\omega t) + c_2 \cos(\omega t))$$

Es ergibt sich die in Abbildung 2.5 dargestellte Schar von Phasenbahnen: Alle Bahnen streben spiralförmig dem Ursprung $(0, 0)$ zu und das unabhängig vom Anfangszustand a, ϕ. Der Ursprung $(0, 0)$ ist der Attraktor des Systems. Man erkennt gut, dass ähnliche Anfangszustände in beiden Systemen nah benachbarte Trajektorien besitzen.

2.2.5 Attraktoren

Ein Attraktor ist eine offene Umgebung im Konfigurationsraum, mit der Eigenschaft, dass die Phasenbahnen dieser Umgebung entgegenstreben: Sei eine offene Menge $U \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ gegeben. Die Punkte $x \in U$ stehen für Orte. Ein Vektorfeld ist eine Abbildung $v : U \to \mathbb{R}^n$. Sie ordnet jedem $x \in U$ den Vektor $v(x)$ zu.

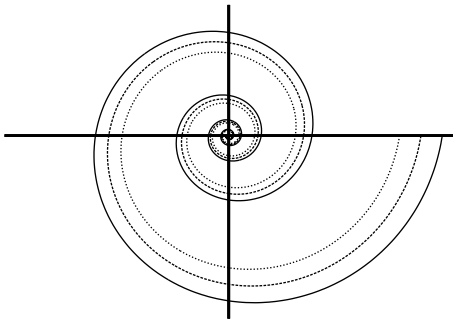


Abbildung 2.5: Phasenraum des gedämpften Pendels

Dies kann beispielsweise die Geschwindigkeit einer strömenden Flüssigkeit sein. Eine Integralkurve ist eine Abbildung $\phi : I \to \mathbb{R}^n$, so dass für alle $t \in I$ gilt: $(t, \phi(t)) \in U$ und

$$\dot{\phi}(t) = v(\phi(t)).$$

Eine Integralkurve ist eine Lösung der Differentialgleichung:

$$\dot{x}(t) = v(x) \tag{2.6}$$

Dies steht ausführlich für das System von Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= v_1(x_1, \ldots, x_n) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= v_n(x_1, \ldots, x_n) \end{aligned}$$

Ist zudem noch für t_0 ein Anfangswert x_0 vorgegeben, so dass $\phi(t_0) = x_0$ gelten soll, so liegt ein *Anfangswertproblem* vor. Der Existenzsatz von Picard-Lindelöf besagt, dass jedes Anfangswertproblem, bei dem F lokal Lipschitz-stetig ist, eine eindeutig bestimmte Lösung besitzt.

Ist die Differentialgleichung nicht exakt lösbar, so behilft man sich mit einer Stabilitätsanalyse und betrachtet das System anhand seiner Attraktoren. Eine Trajektorie $x_j = u_j(t)$ ist *stabil*, wenn zu einem Zeitpunkt $t = t_0$ „benachbarte“ Trajektorien dies auch stets bleiben. Eine Trajektorie x_j heißt *asymptotisch stabil*, wenn zusätzlich $|u_j(t) - v_j(t)| \to 0$ für $t \to \infty$ gilt. Betrachten wir die Variation einer Trajektorie $u_j(t)$, d.h. $u_j(t)+\xi_j(t)$ für kleines $\xi_j(t)$. In diesem Fall gilt asymptotische Stabilität, falls $\xi_j(t) \to 0$ für $t \to \infty$ gilt. Für die Variation erhalten wir aus (2.6):

$$\dot{x}_j(t) + \dot{\xi}_j(t) = v_j(x_1 + \xi_1(t), \ldots, x_n + \xi_n(t)) \tag{2.7}$$

Betrachten wir die Taylor-Entwicklung der Variation bzgl. ξ_j:

$$\dot{x}_j(t) + \dot{\xi}_j(t) = v_j(x_1, \ldots, x_n) + \sum_k \left.\frac{\partial v_j}{\partial \xi_k}\right|_0 \xi_k(t) + \cdots$$

Da $\xi_j(t)$ eine sehr kleine Größe ist, können wir näherungsweise nach dem linearen Term abbrechen. Subtrahieren wir (2.6) $\dot{x}_j(t) = v_j(x_1, \ldots, x_n)$ von der Näherung, so erhalten wir die Linearisierung:

$$\dot{\xi}_j(t) = \sum_k \left.\frac{\partial v_j}{\partial \xi_k}\right|_0 \xi_k(t) = \sum_k A_{jk}\xi_k(t) \quad \text{mit} \quad A_{jk} := \left.\frac{\partial v_j}{\partial \xi_k}\right|_0$$

Diese Analyse gilt sogar allgemein. Man betrachtet dazu die *kritischen Punkte* der Differentialgleichung. Die Nullstellen von $\dot{\phi}$ heißen kritische Punkte. Wenn eine Integralkurve ϕ gegen x_0 konvergiert, dann muss x_0 ein kritischer Punkt sein und die Konvergenz erfordert unendlich viel Zeit: $\phi(t) \to x_0$ für $t \to \infty$.

Ein kritischer Punkt x_0 des Vektorfeldes $v : U \to \mathbb{R}^n$ heißt *Attraktor*, wenn jede Umgebung $K \subseteq U$ von x_0 eine Umgebung V_K enthält, so dass jede in V_K beginnende Integralkurve zu allen Zeiten in K verbleibt und gegen x_0 konvergiert.

Das Einzugsgebiet eines Attraktors ist die Menge aller Punkte, die auf den Attraktor zustreben. Das Einzugsgebiet muss nicht notwendig den ganzen Phasenraum umfassen, es können in einem dynamischen System mehrere Attraktoren mit disjunkten Einzugsbereichen existieren.

Um herauszufinden, ob ein kritischer Punkt x_0 auch ein Attraktor ist, kann man das Feld am Punkt x_0 linearisieren. Dazu bildet man die Ableitung:

$$v' = \begin{pmatrix} \frac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}x_1} & \cdots & \frac{\mathrm{d}v_1}{\mathrm{d}x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\mathrm{d}v_n}{\mathrm{d}x_1} & \cdots & \frac{\mathrm{d}v_n}{\mathrm{d}x_n} \end{pmatrix}$$

Der *Satz von Poincaré-Ljapunov* besagt nun, dass x_0 ein Attraktor ist, wenn jeder Eigenwert der Matrix $A := v'(x_0)$ einen negativen Realteil besitzt.

Dies liegt daran, dass alle Lösungen der linearen Differentialgleichung $\dot{x} = Ax$ Lösungen von der Form $x = p \cdot e^{\lambda t}$ besitzen, wobei λ ein Eigenwert ist. Sind die Realteile aller Eigenwert sämtlich negativ, so konvergieren alle Lösungen $x = p \cdot e^{\lambda t}$ gegen Null. Der kritische Punkt ist stabil. Ist dagegen mindestens ein Eigenwert positiv, dann entfernt sich die Trajektorie von x_0.

Attraktoren können unterschiedliche Erscheinungsformen besitzen. Im einfachsten Fall ist der Attraktor ein Punkt im Konfigurationsraum. Für das Beispiel des gedämpften Pendels ist der Punkt $(0, 0)$ des Phasenraums ein Attraktor, d.h. das System strebt dem Ruhezustand entgegen. Attraktoren können aber auch höherdimensionale Strukturen sein, wie beispielsweise Kurven, die periodisch durchlaufen werden. Dies geschieht in Räuber-Beute-Modellen, bei denen die Populationsgrößen periodisch ansteigen und sinken. Bekanntestes Beispiel hierfür sind die stabilen Räuber-Beute Zyklen im Lottka-Voltera System.

Eine besondere Klasse stellen die *seltsamen Attraktoren* dar, bei denen der Grenzzustand des Systems ein aperiodisches Verhalten zeigt, d.h. dass der Attraktor sich nicht als geschlossene geometrischen Form beschreiben lässt und auch keine ganzzahlige Dimension besitzt. Der Attraktor ist also ein Fraktal. Der bekannteste Attraktor dieser Art ist der in Abbildung 2.6 illustrierte Lorenz-Attraktor.

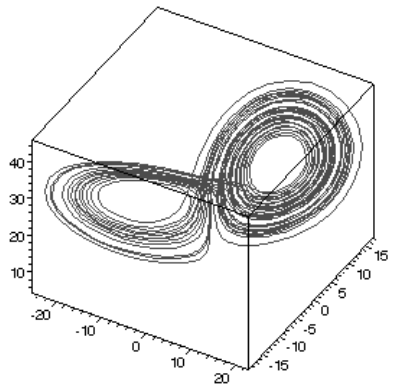


Abbildung 2.6: Der Lorenzattraktor

2.3 Maschinenmodelle und Rückkopplung

Rekursive Modelle erlauben einen Rekurs auf sich selbst, sind also rückgekoppelt und verändern als Folge ihre Struktur. Solche Systeme müssen eine Repräsentation von Prozessen besitzen, auf der sie strukturdynamisch operieren können. Rekursive Systeme sind z.B. in Form von Turing-Maschinen oder rekursiven Funktionen intensiv untersucht worden.

Eine besondere Form der Rekursivität ist die der Selbstähnlichkeit. Die Forschung zur Selbstähnlichkeit ist fester Bestandteil der Chaosforschung, hier besonders im Rahmen der fraktalen Geometrie. Mandelbrot beschäftigte sich mit den Eigenschaften von Fraktalmengen, insbesondere ihrer Selbstähnlichkeit, ihrer Skalenfreiheit und ihren nicht ganzzahligen Dimensionen (siehe Mandelbrot, 1982).

Die Besonderheit ist hierbei die Reproduktion der Systemelemente als Ergebnis der Systemprozesse selbst – kurz: die *Autopoiese*.[4] Die Theorie der Autopoiese nach Humberto Maturana stellt die Reproduktion von Systemen aus sich selbst heraus in den Gegenstand ihrer Betrachtung. Selbstreproduktive Prozesse basieren auch auf einem Generierungsmechanismus, der zum Gegenstand gemacht werden kann. Exemplarisches Beispiel sind Zellen, die in der Lage sind, mit Hilfe von Zellteilungsmechanismen und DNA-Duplizierung sich selbst zu reproduzieren. Wichtig ist hierbei die Autonomie des Systems, d.h. alle externen Signale werden nach internen Mechanismen verarbeitet – das System ist operational geschlossen.

[4] Im allgemeinen Sprachgebrauch geht man davon aus, dass die Systemstrukturen die Dynamik bedingen. Der zentrale Punkt ist hierbei, was als Systemstruktur betrachtet wird. Zum einen können die Systemelemente und ihre Wechselwirkungsrelationen als Systemstruktur aufgefasst werden. Zum anderen kann eine stabile Konfiguration der Elemente zueinander als Systemstruktur bezeichnet werden. Hierbei handelt sich aber um eine Verwechslung der Beschreibungsebenen. Ersteres ist die Struktur der Systemklasse, letzteres die Strukturinstanz. Ersteres ist statisch, letzteres dynamisch, denn die Struktur der Instanz ist ein Produkt der Dynamik der Klasse. Fazit: Systemstrukturen sind oftmals dynamische Größen.

2.3.1 Die Turing-Maschine

Wir betrachten nun das Standardmodell eines zustandbasierten Systems: die Turing-Maschine (TM). Die Turing-Maschine wurde zur Präzisierung des Algorithmenbegriffs eingeführt. Will man beispielsweise die Addition von Zahlen algorithmisch beschreiben, so kann man beide Zahlen untereinander auf kariertem Papier schreiben und rechts beginnend spaltenweise addieren, wobei man sich jeweils den Übertrag merken muss.

Eine Turing-Maschine formalisiert diesen Gedanken in verallgemeinerter Form (vgl. Abb. 2.7). Eine Turing-Maschine besitzt erstens eine endliche Menge von Zuständen Q. In dem Beispiel wurde damit der Übertrag festgehalten. Zweitens besitzt sie ein Speichermedium. Statt eines zweidimensionalen Papiers ist es ausreichend, sich auf eine Dimension einzuschränken: auf ein beidseitiges Turingband. Von den Zellen dieses Bandes kann die Maschine Zeichen eines endlichen Vorrats Γ lesen. Welches Zeichen gerade gelesen wird, bestimmt die Position eines Schreib/Lese-Kopfs. Dies wird genutzt, um die Dynamik zu spezifizieren. Befindet sich die Maschine im Zustand q und liest das Symbol x, dann überschreibt sie das x mit einem neuen Symbol x', wechselt in den Zustand q' und bewegt den Kopf nach links ($\leftarrow$) oder nach rechts ($\rightarrow$). Diese Veränderung wird durch die Turingtafel δ spezifiziert – einer partiellen Abbildung, die ggf. jedem Zustand q und gelesenen Symbol x die Aktion zuordnet:

$$\delta(q, x) = (q', x', m) \quad \text{mit} \quad m \in \{\leftarrow, \rightarrow\}$$

Die Übergangsfunktion δ ist im allgemeinen partiell. Ist $\delta(q, x)$ undefiniert, dann hält die Turing-Maschine einfach an. Initial sind endlich viele Bandfelder mit Symbolen aus dem Eingabealphabet $\Sigma \subseteq \Gamma$ beschrieben. Die restlichen Felder sind mit dem speziellen Symbol $\# \in \Gamma \setminus \Sigma$ beschrieben, dem *blank*. Einige der Zustände sind als Endzustände $F \subseteq Q$ ausgewiesen. Formal wird eine Turing-Maschine als Tupel $M = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, \#, F)$ notiert.

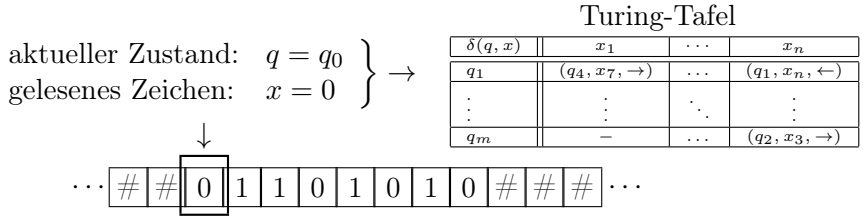


Abbildung 2.7: Eine Turing-Maschine

Eine Konfiguration ist ein Tripel $\alpha = (u, q, v) \in \Gamma^* \times Q \times \Gamma^*$. Hierbei ist uv die Bandinschrift, wobei links und rechts davon nur noch das Symbol # vorkommt, was nicht explizit notiert wird. Der Zustand ist q, und der Schreib-Lese-Kopf befindet sich auf dem ersten Symbol von v. Ein Konfigurationsübergang wird als $\alpha_1 \vdash \alpha_2$ notiert.

Schränkt man die Struktur von δ und damit die erlaubten Kopfbewegungen geeignet ein, so erhält man Unterklassen der Turing-Maschinen, wie beispielsweise den *Endlichen Automaten*, bei dem der Kopf nur nach rechts bewegt wird,

oder den *Kellerautomaten*, der stets nur auf dem Symbol am rechten Ende operiert.

Die oben beschriebene Turing-Maschine ist ein deterministisches Modell. Eine nichtdeterministische Turing-Maschine erhält man, indem man in der Turing-Tafel zu einem Paar (q, y) verschiedene (q', x', m) zur Auswahl hat. In diesem Fall ist der Konfigurationsübergang $\alpha_1 \vdash \alpha_2$ nicht mehr eindeutig von α_1 bestimmt, da es zu jedem α_1 verschiedene Nachfolgekonfigurationen α_2 gibt.

Eine Turing-Maschine kann zum einen dazu verwendet werden, um Sprachen zu erkennen. Die von einer Turing-Maschine akzeptierte Sprache $L(M)$ ist die Menge aller Worte $w \in X^*$, die eine endliche Konfigurationsfolge in einen Endzustand $q_f \in F$ führt:

$$\alpha_0 = (\epsilon, q_0, w) \vdash \alpha_1 \vdash \cdots \vdash \alpha_k = (u, q_f, v) \vdash \cdots$$

Zum anderen können wir mit Turing-Maschine auch Funktionen f definieren. Eine Turing-Maschine berechnet die Funktion $f : \Sigma^* \to \Gamma^*$ genau dann, wenn sie mit der Eingabe v gestartet den Funktionswert $f(v)$ auf das Band schreibt:

$$f(v) = w \iff \big(\forall \epsilon, q_0, v) \vdash \cdots \vdash (u_k, q_k, v_k) : q_k \in F \Longrightarrow (u_k = \epsilon \wedge v_k = w)\big)$$

Die so charakterisierbaren Funktionen heißen Turing-berechenbar. Die *Churchsche These* besagt, dass alle berechenbaren Funktion Turing-berechenbar sind.

Eine Menge $L \subseteq X^*$ heißt *aufzählbar* (auch: *semi-entscheidbar*), wenn es eine berechenbare Surjektion $f : \mathbb{N} \to L$ gibt. Die Funktion f numeriert die Elemente von L also durch: $f(0), f(1), f(2), \ldots$, wobei Elemente in dieser Aufzählung auch mehrfach vorkommen dürfen. Dieses Konzept ist stärker als das der Abzählbarkeit, bei dem die Elemente auch durch eine Funktion f aufgezählt werden, aber für f die Berechenbarkeit nicht gefordert wird. Die Menge der aufzählbaren Sprachen ist identisch mit der Menge aller von Turing-Maschinen erkannten Sprachen.

Eine Menge $L \subseteq X^*$ heißt *entscheidbar*, wenn die Indikatorfunktion $1_L : X^* \to \{0, 1\}$ von einer Turing-Maschine berechnet werden kann, d.h. für alle Elemente $w \in X^*$ kann entschieden werden, ob $w \in L$ gilt oder nicht.

Diese Begriffe – Entscheidbarkeit, Ab- und Aufzählbarkeit – sind in ihrer Extension verschieden. So ist jede entscheidbare Menge aufzählbar und jede aufzählbare Menge auch abzählbar – die Umkehrungen gelten jedoch nicht. Das *Halteproblem* L_H ist die Menge aller Paare (M, w), für die gilt, dass die Turing-Maschine M auf der Eingabe w halten wird:

$$L_H = \{(M, w) \mid M \text{ hält auf der Eingabe } w\}$$

Das Halteproblem L_H ist eine aufzählbare, aber keine entscheidbare Menge. Die *Diagonalsprache* L_d ist die Menge aller Paare (M, w), für die gilt, dass die Eingabe w von M nicht akzeptiert wird:

$$L_d = \{(M, w) \mid w \notin L(M)\}$$

Die Diagonalsprache L_d ist eine abzählbare, aber keine aufzählbare Menge. Details finden sich in (Hopcroft und Ullman, 1979).

2.3.2 Nebenläufige Automaten

Der Formalismus der Petrinetze geht auf die Dissertation Carl Adam Petris zurück (vgl. Petri, 1962). Petrinetze betonen, im Gegensatz zu den sequentiell arbeitenden Turing-Maschinen, die Verteiltheit des Zustandes sowie die Nebenläufigkeit unabhängiger Aktionen. Sie haben sich in der Informatik als zentrales Beschreibungsmittel nebenläufiger, zustandsdiskreter Systeme etabliert.

Ein Petrinetz kann man sich als die Synchronisation mehrerer Automaten vorstellen. Abbildung 2.8 zeigt zwei Automaten, die jeweils die gleiche Aktion ausführen. Um auszudrücken, dass beide Zustandsübergange a synchron erfolgen sollen, fügen wir eine Transition wie in Abbildung 2.9 ein.

Grundlegend sind die sogenannten einfachen Petrinetze, deren Marken unstrukturiert sind. Sie unterteilen sich wiederum in elementare Netzsysteme, deren Stellen nur einfach markiert sein können, und in Stellen/Transitionsnetze, deren Stellen mehrfach markiert sein können (vgl. auch Reisig und Rozenberg, 1998). Das Modell der gefärbten Netze erlaubt dann eine Strukturierung der Marken.

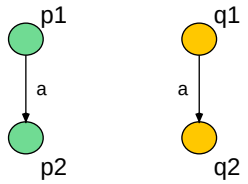


Abbildung 2.8: Zwei Automaten

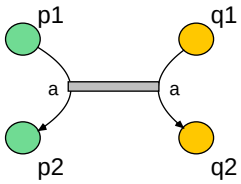


Abbildung 2.9: Petrinetz

Ein Petrinetz $N = (P, T, F)$ ist ein gerichteter, bipartiter Graph, der aus zwei disjunkten Mengen besteht: den Stellen P und den Transitionen T. Stellen sind die passiven, Transitionen die aktiven Elemente. Die Flussrelation F beschreibt die Kanten zwischen Stellen und Transitionen. Für ein gegebenes Netz ist der Vorbereich eines Elementes x definiert als ${}^\bullet x = \{y \mid yFx\}$ und der Nachbereich als $x^\bullet = \{y \mid xFy\}$.

Eine Markierung C ist eine Teilmenge der Stellen P. Die Dynamik eines Petrinetzes wird durch das Schalten von Transitionen bestimmt. Eine Transitionsmenge U ist aktiviert, wenn der Vorbereich von U markiert, der Nachbereich von U unmarkiert und die Umgebungen aller Transitionen in U disjunkt sind, d.h. wenn alle Transitionen nebenläufig zueinander sind. Sei $C \subseteq P$ die aktuelle Markierung des Netzes N. Eine Transitionsmenge $U \subseteq T$ ist in C aktiviert (notiert als $C \xrightarrow{U}$), wenn gilt:

$$ {}^\bullet U \subseteq C \wedge U^\bullet \cap C = \emptyset \wedge \forall t, t' \in U : t \neq t' \Longrightarrow ({}^\bullet t \cup t^\bullet) \cap ({}^\bullet t' \cup t'^\bullet) = \emptyset $$

Eine Transitionsmenge U, die in der Markierung C aktiviert ist, kann in eine Nachfolgemarkierung C' schalten (notiert als $C \xrightarrow{U} C'$), die definiert ist als $C' = (C \setminus {}^\bullet U) \cup U^\bullet$.

Nach dieser Definition ist die leere Ereignismenge aktiviert, und die Nachfolgemarkierung ist die ursprüngliche: $C' = C$. Aktiviert die Markierung C eine Transitionsmenge $U \subseteq E$, dann ist auch jede Teilmenge $U' \subseteq U$ aktiviert.

In der Definition drückt sich direkt die Nebenläufigkeit aller Transition in U aus: Wenn die Umgebung (${}^\bullet t \cup t^\bullet$) einer Transition $t \in U$ disjunkt zu allen anderen Transitionen $t' \in U$ ist, dann ist ihre Aktivierung und ihr Effekt unabhängig von allen anderen Transitionen.

Platz/Transitions-Netze (kurz: P/T-Netze) sind Petrinetze, deren Stellen mehrfach markiert sein können. Da auf einer Stelle mehrere Marken vorhanden sein können, ist es möglich, dass Transitionen mehrere Marken zum Schalten benötigen, was durch eine Kantengewichtung ausgedrückt wird. Da die Stellen beliebig viele Marken aufnehmen können, ist die Menge der erreichbaren Markierungen eines P/T-Netzes nicht beschränkt. P/T-Netze sind ein Beispiel für ein System, dessen Struktur linear ist, denn die Schaltregel lässt sich im Rahmen der linearen Algebra beschreiben. Die Erreichbarkeitsmenge eines P/T-Netzes ist im allgemeinen jedoch noch nicht einmal semi-linear.

Auch Petrinetze sind reflexiv, sobald man als Marken der Netze wiederum Petrinetze erlaubt. Dieses Paradigma der *Netze in Netzen* wurde von Rüdiger Valk in (Valk, 1991, 2003) für eine zweistufige Hierarchie eingeführt und in (Köhler, 2004) auf den unbeschränkten Fall verallgemeinert.

2.3.3 Der Lambda-Kalkül

Was ist der mathematische Gehalt eines Funktionsausdrucks, beispielsweise $f(x) = x^2$? Ist es eine spezielle einstellige Funktion f in der Variablen x oder ist es eine Abbildungsvorschrift, die ein beliebiges x auf x^2 abbildet. Eine Funktion nach ersterer Auffassung ist Träger von Eigenschaften, z.B. der Stetigkeit. Funktionen nach letzterer Auffassung sind Berechnungsvorschriften.

Der Unterschied besteht darin, ob x ein Platzhalter sein soll oder für einen (beliebigen) Wert stehen soll. Dass diese beiden Anschauungen unterschiedlich sind wurde von Gotlieb Frege festgestellt. Den Unterschied zwischen beiden Auffassung kann man leicht daran feststellen, wenn man sich fragt, was der Ausdruck $f(3)$ bedeuten soll. Es handelt sich offensichtlich nicht um eine Funktion. Wir können es aber als Aufforderung zum Ausrechnen verstehen: $f(3) = 3^2 = 9$.

Alonso Church löste dieses Problem, indem er beide Konzepte klarer trennte: Die Funktion f wird durch einen Term $f = (\lambda x.x^2)$ repräsentiert, wobei λx bedeutet, dass die Variable x in f gebunden vorkommt. Der Charakter der Ausrechnens wird durch den Term $(f3)$ bezeichnet. Die Terme werden hintereinander notiert. Der Term $(f3)$ wird reduziert, indem das Argument 3 für jedes Auftreten der Variablen x eingesetzt wird: $(f3) \to ((\lambda x.x^2)3) \to 3^2 \to 9$.

Die Terme des (ungetypten) Lambda-Kalküls werden induktiv gebildet: Jede Variable $v \in V$ ist ein λ-Term. Sind M und N λ-Terme und $v \in V$ eine Variable, dann sind $(\lambda v.M)$ und (MN) λ-Terme.

Der Operator λ bindet Variablen. Folglich ist zwischen freien und gebundenen Variablen zu unterscheiden. So ist im Term $(\lambda x.x)$ die Variable x gebunden, während sie in $(\lambda y.x)$ frei vorkommt. Im Term $(\lambda x.x)x$ kommt x sowohl gebunden als auch frei vor.

Der konkrete Name einer gebundenen Variable ist irrelevant, d.h. $(\lambda x.x)$ und $(\lambda y.y)$ bezeichnen das gleiche Objekt. Die α-Äquivalenz identifiziert alle Terme, die durch Umbenennen gebundener Variablen ineinander überführbar sind. Es

gilt also $(\lambda x.x) \equiv_\alpha (\lambda y.y)$. Mit Hilfe der α-Äquivalenz ist es stets möglich, einen Term M so umzuformen, dass freie und gebundene Variablen disjunkt sind und dass jede gebundene Variable einen eigenen Bezeichner besitzt.

Die β-Regel formalisiert die Intuition des Ausrechnens, d.h. die Applikation (MN) eines Argumentes N auf einen variablenbindenden Ausdruck M führt zu einer Rechnung auf M. Die β-Regel lautet:

$$(\lambda x.M)N \underset{\beta}{\rightarrow} M[x \leftarrow N]$$

Hierbei bedeutet $M[x \leftarrow N]$ die Substitution aller freien Vorkommen von x in M durch N (ohne Variablen einzufangen). Ein Term hat im allgemeinen mehrere β-Redukte, da verschiedene Teilterme alternativ reduziert werden können.

Dass dieser Nichtdeterminus keine Probleme bereitet zeigt das *Church-Rosser Theorem*: Gilt $M \overset{*}{\underset{\beta}{\rightarrow}} N_1$ und $M \overset{*}{\underset{\beta}{\rightarrow}} N_2$, dann existiert ein N_3 derart, dass $N_1 \overset{*}{\underset{\beta}{\rightarrow}} N_3$ und $N_2 \overset{*}{\underset{\beta}{\rightarrow}} N_3$ gilt.

Daraus folgt, dass jeder λ-Term höchstens eine β-Normalform hat. Leider ist die β-Reduktion im allgemeinen nicht terminierend, so dass nicht alle λ-Terme eine β-Normalform besitzen. Einfachstes Beispiel ist der Term $\lambda x.xx$. Wenden wir diese Funktion auf sich selbst an, so erhalten wir:

$$(\lambda x.xx)(\lambda x.xx) \underset{\beta}{\rightarrow} (\lambda x.xx)(\lambda x.xx) \underset{\beta}{\rightarrow} \cdots$$

Eine Besonderheit des Lambda-Kalküls ist, dass Funktionen wie normale Werte behandelt werden. Einfachstes Beispiel ist die Identitätsfunktion, die durch den Term $\lambda x.x$ repräsentiert wird. Wenden wir diese Funktion auf sich selbst an, so erhalten wir als Ergebnis eine Funktion, nämlich die Identitätsfunktion selbst:

$$(\lambda x.x)(\lambda x.x) \underset{\beta}{\rightarrow} (\lambda x.x)$$

Die β-Äquivalenz $\equiv_\beta$ ist als die kleinste Äquivalenz definiert, die $\rightarrow_\beta$ enthält. Ist es entscheidbar, ob für zwei λ-Terme M und N die Äquivalenz $M \equiv_\beta N$ gilt? Diese Frage ist bedeutend, denn eine positive Antwort würde es beispielsweise erlauben, zu einer als λ-Term gegebenen Funktion f die kürzeste Repräsentation zu finden, z.B. indem man alle λ-Terme nach Größe sortiert aufzählt und testet, ob der aktuelle Term äquivalent zu f ist. Das Verfahren terminiert spätestens, sobald der Term f selbst aufgezählt wird. Leider existiert ein solches Verfahren nicht, da das Lambda-Kalkül so ausdrucksstark ist, dass er alle berechenbaren Funktion spezifizieren kann. Daraus folgt – in Analogie zur Unentscheidbarkeit des Halteproblems für Turing-Maschinen – die Unentscheidbarkeit der β-Äquivalenz. Für Details siehe (Barendregt, 1985).

2.3.4 Rekursive Funktionen

Der Lambda-Kalkül mit β-Reduktion ist bereits mächtig genug, um die natürlichen Zahlen zu kodieren und alle berechenbaren Funktionen zu spezifizieren. Eine berechenbare Funktionen heißt auch rekursiv, weil sie durch Rekursion

$m \setminus n$	0	1	2	3	...	n
0	1	2	3	4		$n+1$
1	2	3	4	5		$n+2$
2	3	5	7	9		$2n+3$
3	5	13	29	61		$2(n+3)-3$
4	13	65533	$2^{65536}-3$	$2^{2^{65536}}-3$		$\underbrace{2^{2^{\cdot^{\cdot^{2}}}}}_{(n+3)\text{-mal}}-3$

Abbildung 2.10: Werte der Ackermannfunktion

erzeugt werden kann. Die Fakultätsfunktion ist das Standardbeispiel für eine rekursiv definierte Funktion:

$$n! := \begin{cases} 1 & \text{falls } n = 0 \\ n \cdot (n-1)! & \text{falls } n > 0 \end{cases}$$

Sie hat die Eigenschaft, dass die Berechnung von $n!$ genau n rekursive Aufrufe benötigt: $n! = n(n-1)! = n(n-1)(n-2)! = \cdots = n(n-1)\cdots 2 \cdot 1! = n(n-1)\cdots 2 \cdot 1$. Funktionen dieser Art werden in der Klasse der primitiv-rekursiven Funktionen zusammengefaßt.

Eine Funktion $f : \mathbb{N}^n \to \mathbb{N}$ heißt primitiv-rekursiv, wenn sie sich aus den folgenden Funktionen zusammensetzen lässt:

1. Die Konstante 0 als nullstellige Funktion.
2. Die Nachfolgerfunktion $s : \mathbb{N} \to \mathbb{N}$ mit $s(n) = n + 1$
3. Projektionen: $\pi_i : \mathbb{N}^n \to \mathbb{N}$ mit $\pi_i(x_1, \ldots, x_i, \ldots, x_n) = x_i$.
4. Primitive Rekursion: Seien $f : \mathbb{N}^n \to \mathbb{N}$ und $g : \mathbb{N}^{n+2} \to \mathbb{N}$ primitiv-rekursive Funktionen, dann ist $PR_{f,g} : \mathbb{N}^{n+1} \to \mathbb{N}$ eine rekursive Funktion, definiert durch $(\bar{x} = x_1, \ldots, x_n)$:

$$PR_{f,g}(n, \bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}), & \text{falls } n = 0 \\ g\big(n-1, \bar{x}, PR_{f,g}(n-1, \bar{x})\big), & \text{falls } n > 0 \end{cases}$$

Das Schema der primitiven Rekursion entspricht einer FOR-Schleife. Jede primitiv-rekursive Funktionen $f : \mathbb{N}^n \to \mathbb{N}$ ist total, d.h. für alle Eingaben $\bar{x} \in \mathbb{N}^n$ ist $f(\bar{x})$ definiert.

Die Umkehrung gilt jedoch nicht, denn nicht jede totale Funktion ist auch primitiv-rekursiv, wie das Beispiel der *Ackermann-Funktion* zeigt (vgl. Hermes, 1971). Die Ackermann-Funktion $A : \mathbb{N} \times \mathbb{N} \to \mathbb{N}$ ist mit Hilfe einer doppelten Rekursion definiert:

$$A(m,n) = \begin{cases} n+1, & \text{falls } m = 0 \\ A(m-1, 1), & \text{falls } m > 0 \text{ und } n = 0 \\ A(m-1, A(m, n-1)), & \text{falls } m > 0 \text{ und } n > 0 \end{cases}$$

Die Ackermann-Funktion ist total, wächst aber sehr schnell (vgl. dazu Abb. 2.10) – schneller als jede primitiv-rekursive Funktion.

Eine Oberklasse der primitiv-rekursive Funktionen ist die Menge der rekursiven Funktionen. Eine Funktion heißt *rekursiv*, wenn sie durch die Operatoren der primitiven Rekursion und zusätzlich der μ-Rekursion gebildet werden kann: Sei $f : \mathbb{N}^{n+1} \to \mathbb{N}$, dann ist $(\mu f) : \mathbb{N}^n \to \mathbb{N}$ eine rekursive Funktion definiert durch:

$$(\mu f)(\bar{x}) := \min\{n \mid f(n, \bar{x}) = 0\}$$

Die μ-Rekursion entspricht einer WHILE-Schleife. Rekursive Funktion sind im allgemeinen nicht total. Sei f eine rekursive Funktion mit $f(n, \bar{x}) > 0$ für alle n und $\bar{x}$, dann ist (μf) für alle Argumente $\bar{x}$ undefiniert. Die Menge der rekursiven Funktion ist identisch mit der Menge der Turing-berechenbaren Funktionen.

Um beliebige rekursive Funktion im Lambda-Kalkül zu repräsentieren, wird die Fixpunkteigenschaft ausgenutzt. Ein Fixpunkt einer Funktion ist ein Wert x mit $f(x) = x$. Im Lambda-Kalkül ist X ein Fixpunkt von F, wenn $FX \equiv_\beta X$ gilt.

Es gilt das folgende Theorem. Im ungetypten Lambda-Kalkül hat jeder Term einen Fixpunkt: Der Turingsche Fixpunktoperator ist $Y = AA$ mit $A = \lambda x.\lambda y.y(xxy)$. Sei F ein beliebiger Term. Setze $N = YF$:

$$N = YF = AAF = (\lambda x.\lambda y.y(xxy))AF \xrightarrow[\beta]{*} F(AAF) = F(YF) = FN$$

Damit lassen sich rekursive Spezifikationen entwickeln. Beispielsweise lautet die Fakultätsfunktion im Lambda-Kalkül:

$$\mathbf{fact} = \lambda n.\mathbf{if_then_else}(\mathbf{iszero}\ n)(1)(\mathbf{mult}\ n(\mathbf{fact}\ (\mathbf{pred}\ n)))$$

Schreibt man dies um in

$$\mathbf{fact} = \underbrace{\Big(\lambda f.\lambda n.\mathbf{if_then_else}(\mathbf{iszero}\ n)(1)(\mathbf{mult}\ n(f(\mathbf{pred}\ n)))\Big)}_{F}\ \mathbf{fact}$$

dann erhält man die Fixpunktgleichung: $\mathbf{fact} = F\,\mathbf{fact}$. Diese besitzt – wie wir gesehen haben – die Lösung $\mathbf{fact} = YF$. Auf diese Art kann jede rekursiv spezifizierte Funktion definiert werden.

2.3.5 Selbstbezüglichkeit

Reflexivität spielt in der Informatik eine große Rolle. Ausgangspunkt der Analyse ist das Russellsche Paradoxon der naiven Mengentheorie. Bezeichnet man jede Gesamtheit von Elementen als Menge, dann ist kann man eine Menge R folgendermaßen definieren:

R ist die Menge aller Mengen, die sich nicht selbst enthalten.

Formal lässt sich dies als $R := \{x \mid x \notin x\}$ notieren.[5] Eine solche selbstbezügliche Formulierung ist bereits am Beispiel der Diagonalsprache L_d im Kontext der Turing-Maschinen aufgetaucht. Dort hatte sie zur Folge, dass L_d von keiner Turing-Maschine erkannt werden kann.

Die Frage ist nun, ob R sich selbst enthält: Angenommen R enthält sich nicht selbst, dann gilt $R \notin R$ und aus der Definition $R := \{x \mid x \notin x\}$ folgt dann mit $x = R$, dass $x \in R$ gilt. Also impliziert $R \notin R$ gerade $R \in R$. Ein Widerspruch. Nehmen wir umgekehrt $R \in R$ an, dann folgt aus der Definition $R := \{x \mid x \notin x\}$ mit $x = R$, dass $x \notin R$ gilt. Also erhalten wir in beiden Fällen einen Widerspruch.

Ausgehend von dieser Paradoxie versuchten Whitehead und Russell (1910) in der *Principia mathematica* eine widerspruchsfreie Axiomatisierung der Mathematik zu erreichen. Ein ähnliches Programm verfolgte der Mathematiker David Hilbert, der eine logische Fundierung der Mathematik anstrebte. Der Logikkalkül sollte frei von Widersprüchen sein und alle mathematischen Sätze beweisen können. Wie Kurt Gödel 1932 in seiner Habilitationsschrift mit dem Titel *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme* bewies, gibt es jedoch für jedes widerspruchsfreie System mathematische Aussagen, die weder beweisbar noch widerlegbar sind (Gödel, 1932).

Betrachten wir den Widerspruch im Russellschen Paradoxon. Der Widerspruch rührt aus der Tatsache, dass das definierte Elemente (hier: R) mit Hilfe von Objekten definiert wird (hier: x), die durch R instantiiert werden können. Die Eigenschaft einer selbstbezüglichen Definition heißt *Imprädikativität*.

Auch die Turing-Maschine besitzt diese Form der Selbstbezüglichkeit. Die Turing-Maschine ist ein universelles Modell, d.h. es gibt eine *universelle Turing-Maschine* U, die gestartet mit der Kodierung einer Turing-Maschine M und eines Eingabewortes w die Berechnungen von M auf dem Wort w simuliert. Die Universalität des Formalismus, d.h. die Fähigkeit der Selbstrepräsentation hat zu zahlreichen Untersuchungen geführt, die die Übertragbarkeit von Konzepten wie das der universellen Turing-Maschine oder der (Un-)Entscheidbarkeit auf andere Disziplinen wie Philosophie und künstliche Intelligenz zum Gegenstand hatte. Die bekannteste Konsequenz dieser Selbstkodierbarkeit ist die *Unentscheidbarkeit des Halteproblems*: *Halteproblem* Es gibt keinen Algorithmus, der für eine beliebige Turing-Maschine entscheiden könnte, ob sie irgendwann halten wird oder nicht.

Imprädikativität ist einerseits ein mächtiges Werkzeug der Mathematik, da sich viele Konzepte elegant durch selbstbezügliche Definition formalisieren lassen. Andererseits sind sie oftmals der Ausgangspunkt von logischen Paradoxien. Ein Ausweg aus der Problematik bieten getypte Systeme. Eine Erweiterung des Lambda-Kalküls besteht darin, den Termen Typen zuzuweisen (Barendregt, 1992). Dies geschieht, um die Problem der Diagonalisierung zu vermeiden. Die Betrachtung getypter Systeme zeigt, dass Imprädikativität, d.h. selbstbezügli-

[5] Eine bekannteste anekdotische Einkleidung ist die Stellenausschreibung, in der ein Babier gesucht wird, der alle Männer rasieren soll, die sich nicht selbst rasieren. Muss sich der Babier selbst rasieren? Eine Variante stammt Roger Penrose. In einer Bibliothek gibt es zwei Kataloge. Der erste Katalog verzeichnet aller Bücher, die sich selbst erwähnen, der zweite all jene, die das nicht tun. Im welchen Katalog taucht der zweite Katalog auf?

che Definitionen, nicht per se problematisch ist. So ist das *System F* und auch der *calculus of construction*, die imprädikative Definitionen erlauben, frei von Widersprüchen (vgl. Girard u. a., 1989; Coquand und Huet, 1988).

Ebenso existieren Automatenklassen, innerhalb derer es jeweils universelle Maschinen gibt, ohne dass dies wie bei den Turing-Maschinen zu Problemen der Imprädikativität führte.

2.3.6 Modelle der Strukturbildung

Die mathematischen Ursprünge zur Modellierung von Selbstorganisation finden sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, also bemerkenswerter Weise lange vor der Verbreitung von Computern. Die betrachteten Modelle zeichnen sich meist dadurch aus, dass sie von einer Vielzahl verbundener Systeme ausgehen, die jeweils völlig symmetrisch in ihrem Aufbau sind. Die Symmetriebrechung und damit auch die Musterbildung erfolgt durch den Zustand der einzelnen Elemente, der es erlaubt, lokale Unterschiede zu propagieren und zu verstärken.

Wir betrachten im folgenden klassische Modelle wie zellulare Automaten, Lindenmayer-Systeme, neuronale Netze, evolutionäre Programmierung und Ameisenkolonien.

Zellulare Automaten Zellulare Automaten wurden von Stanislaw Ulam und John von Neumann in den 1940er entwickelt, um das Verhalten komplexer Systeme zu studieren (von Neumann, 1966). Ausgangspunkt war dabei die Frage, wie sich selbst reproduzierende Automaten beschreiben lassen, analog zu den Möglichkeiten biologischer Systeme. Bestimmte zellulare Automaten sind zur Reproduktion fähig, indem sie ihr Muster auf andere Bereiche des Gitter übertragen können (Langton, 1984).

Zellulare Automaten arbeiten massiv parallel. Sie basieren auf elementaren Elementen, den Zellen. Jede Zelle hat dabei nur eine lokalen Sicht auf das System. Emergentes Verhalten entsteht in der lokalen Interaktion.

Es handelt sich um Systeme, bei denen Raum und Zeit diskret sind. Die Zellen sind in einer diskreten Struktur, dem Zellraum Z aufgebaut. Es sind verschiedene Geometrien denkbar, beispielsweise rechteckige, hexagonale oder dreieckige. Die einfachste Struktur ist das d-dimensionale Gitter: $Z = \mathbb{Z}^d$. Typische Beispiele betrachten $d = 1, 2, 3$.

Jede Zelle $z \in Z$ kommuniziert mit den Elementen seiner Nachbarschaft. Die Nachbarschaft N_z ist für alle Zellen strukturgleich.

Jede Zelle z ist ein einfacher Automat mit endlicher Zustandsmenge Q. Der Regeln des Automaten sind für alle Zellen identisch. Die Konfiguration eines zellularen Automaten ergibt sich aus den Zuständen aller Zellen: $q : Z \to Q$.

Die Zustände eines zellularen Automaten entwickeln sich über die Zeit, d.h. zu jedem Zeitpunkt t gibt es den Zustand $q_t(z)$ der Zelle z. Der Nachfolgezustand $q_{t+1}(z)$ einer Zelle z ergibt sich direkt aus den Zuständen aller Knoten n der Umgebung N_z, d.h. aus $q_t(N_z) := (q_t(n))_{n \in N_z}$. Der Übergang wird durch die für alle Zellen identische Funktion δ bestimmt:

$$q_{t+1}(z) = \delta(q_t(N_z))$$

Die bekannteste Ausprägung eines zellularen Automaten ist das von John Conway entwickelte *game of life*. Es handelt sich hierbei um einen zweidimensionalen zellularen Automaten, bei dem jede Zelle nur zwei Zustände hat: aktiv und passiv (auch: lebendig und tot). Das Spielbrett ist dabei entweder in beiden Dimensionen unendlich oder ein Torus, den man erhält, wenn man gegenüberliegende Ränder des endlichen Spielbrettes miteinander verklebt. Aktive Zustände werden als Marken auf einem Spielbrett dargestellt. Initial sind nur endlich viele Zellen aktiv. Die Umgebung einer Zelle sind alle acht umliegende Zellen, die Zelle selbst gehört nicht dazu. Eine lebendige Zelle mit weniger als zwei aktiven Nachbarn stirbt aus Einsamkeit, bei mehr als drei Nachbarn an Enge. Sie bleibt aktiv, wenn in der Umgebung einer Zelle genau zwei oder drei aktive Nachbarn sind. Eine Zelle wird geboren, wenn es in der Umgebung drei Nachbarn gibt.

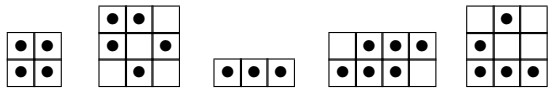


Abbildung 2.11: Reproduzierende Muster

In diesem Automaten gibt es verschiedene sich wiederholende Muster, unter anderen *block*, *boat*, *blinker*, *toad* oder *glider* (vgl. Abb. 2.11). Diese Objekte wandern im Laufe der Zeit über das Gitter. Es gibt sogar Konfigurationen, die ein unbeschränktes Wachstum zeigen, indem sie ständig neue Objekte erzeugen. Das erste Muster dieser Art wurde am Massachusetts Institute of Technology gefunden und wird nach seinem Leiter *Gosper gun* genannt. Dieses Muster produziert ständig neue glider.

Zellulare Automaten sind Turing-mächtig. Hierbei reicht bereits ein eindimensionaler Automat, der das Turingband simuliert. Sogar das *game of live* kann jede Berechnung simulieren.

Zellulare Automaten arbeiten deterministisch, so dass es nur einen Nachfolgezustand gibt, wohingegen zu einem gegebenen Zustand der Vorgänger nicht eindeutig ist. Es gibt sogar einen Zustand, den von R. Banks gefundenen *Garten Eden*, der gar keinen Vorgänger hat, der also auch von keiner anderen Konfiguration je erreicht wird.

Anwendungsgebiete von zellulare Automaten sind die Modellierung von Stoffströmen, Verkehrsimulationen, die Programmierung von Hardwarebausteinen (speziell *field-programmable gate arrays*, FPGAs) und biologische Wachstumsprozesse. Bekanntestes Beispiel ist hier das sehr komplexe Muster auf der Schale der Schnecke *oliva porphyria* (vgl. Meinhardt, 1998). Dieses Muster ergibt sich aus der Hormonkonzentration, die sowohl aktivierende und auch hemmende Wirkung auf die Zellen hat. Die Zerfalls- und Diffusionsprozesse des Hormons lassen sich durch einen zellularen Automaten modellieren.

Lindenmayer-Systeme Lindenmayer-Systeme wurden von der Biologin Astrid Lindenmayer entworfen, um das Wachstum von Pflanzen zu studieren (vgl. Prusinkiewicz und Lindenmayer, 1990). Ein *Lindenmayer-System*, kurz: L-System

ist ein formales System

$$G = (\Sigma, h, w_0)$$

bestehend aus dem Alphabet Σ, einer endlichen Substitution $h : \Sigma \to 2^{\Sigma^*}$ mit $h(a) \neq \emptyset$ für alle $a \in \Sigma$ und einem Initialwort $w_0 \in \Sigma^*$.

Jede Substitution von a in $w \in h(a)$ wird Produktion genannt und als $a \to w$ notiert. Anders als bei Grammatiken wird bei L-Systemen nicht zwischen Variablen und Terminalen unterschieden. Die Menge der generierten Wörter ist definiert als:

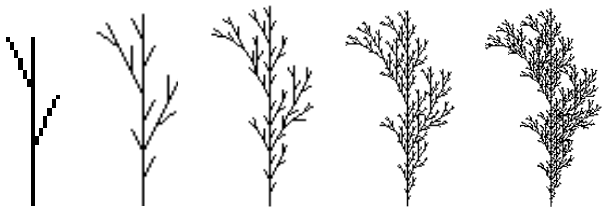
$$L(G) = \bigcup_{i \geq 0} h^i(w_0)$$

Es gibt weitere Akzeptierungsbedingungen, beispielsweise, indem einige Symbole ausgezeichnet werden und nur Worte über diesen betrachtet werden (siehe dazu Salomaa, 1987).

Da eine Substitution immer auf dem gesamten Wort vorgenommen wird, entspricht der Übergang von $w_i \in h^i(w_0)$ zu einem $w_{i+1} \in h^{i+1}(w_0)$ der gleichzeitigen Regelanwendung auf alle Symbole in w_i. Die wird genutzt, um die parallel stattfindenden Wachstumsprozesse zu modellieren.

Ursprünglich studierte Lindenmayer das Wachstum von Algen. Als einfaches Beispiel können wir das L-System mit $\Sigma = \{a, b\}$, den Substitutionen $a \to b$ und $b \to ab$ betrachten. In diesem Fall gibt es nur eine einzige Substitution, so dass jedes $h^i(w_0)$ eine einelementige Menge darstellt. Beginnen wir mit $w_0 = a$, dann erhalten wir $h^1(w_0) = b$, $h^2(w_0) = ab$, $h^3(w_0) = bab$, $h^4(w_0) = abbab$, $h^5(w_0) = bababbab$, $h^6(w_0) = abbabbababbab$, $h^7(w_0) = bababbababbabbababbab$ usw.

Diese Folge modelliert den Wachstumsprozess, der durch die Fibonaccifolge beschrieben wird. Die Länge $|h^i(w_0)|$ entspricht der i-ten Fibonaccizahl.



$i = 1$ $i = 2$ $i = 3$ $i = 4$ $i = 5$

Abbildung 2.12: Darstellung des Pflanzenwachstums

Die ersten mit Lindenmayer-Systemen formalisierte Modelle beschreiben die Beziehung benachbarter Zellen. Des wurde in weiterer Arbeit auch auf komplexe Systeme ausgeweitet. Die selbstbezügliche Natur der L-Systeme eignet sich schön, um fraktale, d.h. selbstähnliche Strukturen, wie sie beim Pflanzenwachstum entstehen, zu modellieren. Die entstehenden Strukturen besitzen sogar anschauliche Darstellungen, sobald man die Symbole eines Wortes $w \in h^i(w_0)$ auch dazu benutzt, räumliche Struktur zu beschreiben. Dazu benutzt man die Klammern [und], um die baumartige Verschachtelung darzustellen und die

Symbole + und −, um die Abweichung von der aktuellen Wachstumsrichtung darzustellen. Eine fraktale Pflanze entsteht dem Start $w_0 = F$ und der Regel $F \to F[-F]F[+F][F]$. Zeichnet man die Links-/Rechts-Bewegungen jeweils mit einem konstanten Winkel, so erhält man die graphische Darstellung eines Baumes (vgl. Abb. 2.12).

Neuronale Netzwerke Die Besonderheit von zellularen Automaten ergibt sich aus ihrer Möglichkeit, komplexe Muster hervorzubringen. Die Dynamik bezieht sich dabei allein auf den Zustand der Zellen, da die Nachbarschaft der Zellen statisch ist. Das Forschungsgebiet der künstlichen neuronalen Netzwerke verallgemeinert den Ansatz, indem er lokale Interaktionen mit der Möglichkeit zum Lernen kombiniert.

Biologische neuronale Netzwerke bestehen aus Nervenzellen, den Neuronen, die durch Nervenfasern, den Synapsen, mit anderen Neuronen verbunden sind. Mit Hilfe der Synapsen tauschen die Neuronen chemische Botenstoffe aus, die als elektrisches Potential wirksam werden. Erreicht das kumulierte Potential aller Eingänge eines Neurons einen Schwellwert, dann feuert das Neuron, d.h. es sendet einen elektrischen Impuls auf den Ausgang. Die Reaktionszeiten der Neuronen liegen im Bereich von Millisekunden, sind also verglichen mit den Taktraten eines normalen PCs sehr groß. Die Besonderheit ist, dass sich die Verbindungsmuster zwischen den Neuronen langfristig ändern können.

McCulloch und Pitts (1943) entwickelten ein formales Modell eines neuronalen Netzes. Es wird angenommen, dass es die n Neuronen $1, \ldots, n$ gibt, die die Anregungswerte $a_i = 0$ oder 1 annehmen können. Alle Neuronen sind im Prinzip miteinander verbunden, aber jede Verbindung von i zu j wird durch $w_{i,j}$ gewichtet, wobei $w_{i,j} = 0$ bedeutet, dass keine Verbindung besteht.

Wenn a_i^t der Zustandswert des Neurons i zum Zeitpunkt t ist, dann ergibt sich der Eingangswert als $\sum_{j=1}^{n} w_{j,i} a_j^t$. Ist der Eingangswert größer als der Schwellwert s_i, dann ist das Neuron aktiviert und regt somit auch seine Umgebung an:

$$a_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{falls } \sum_{j=1}^{n} w_{j,i} a_j^t \geq s_i \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Neuronale Netze sind dann mit logischen Schaltkreisen verwandt. Man kann zeigen, dass neuronale Netze Turing-Maschinen simulieren können.

Man kann neben den binären Neuronen auch solche betrachten, deren Zustandsmenge durch das reellwertige Intervall $[0, 1]$ beschrieben wird, sogenannte sigmoide Neuronen. Dann ist es nicht notwendig, den Zustandsübergang sprunghaft zu gestalten, sondern kann ihn mit der Sigmoid-Funktion stetig modellieren. Auch ist es nicht notwendig, dass alle Neuronen ihren Zustandswechsel synchron vollziehen.

Will man das neuronale Netzwerk als Automat betrachten, so definiert man einige der Neuronen als Eingangsneuronen, deren Anregungszustand die initiale Konfiguration beschreibt, und einige als Ausgangsneuronen, die die Reaktion des Netzwerks beschreiben. Eingangsneuronen werden nicht durch andere Neuronen beeinflusst, d.h. für alle Eingangsneuronen i gilt $w_{j,i} = 0$, während Ausgangsneuronen keine anderen Neuronen beeinflussen, d.h. für $w_{i,j} = 0$ für alle

Ausgangsneuronen i. Allen anderen Neuronen werden als interne Neuronen bezeichnet. In typischen Architekturen werden Neuronen in Schichten angeordnet, wobei Neuronen nur mit den benachbarten Schichten verkoppelt werden (vgl. Abb. 2.13).

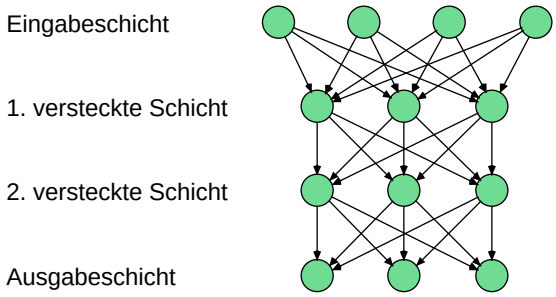


Abbildung 2.13: Neuronales Netz mit zwei versteckten Schichten

Neuronale Netze können zur Mustererkennung, beispielsweise zur Zeichenerkennung eingesetzt werden. Sei das Muster als schwarz/weißes Punktraster der Auflösung 32×32 gegeben, dann werden die $32 \cdot 32$ Eingansgneuronen mit diesen Werten initialisiert. Nach einer Einschwingphase soll sich dann am Ausgang die binäre Kodierung des Zeichens ablesen lassen.

Für die zielgerichtete Programmierung besteht die Herausforderung darin, für das Problem geeignete Anzahlen versteckter interner Neuronen, Schwellwerte s_i und Kantengewichte $w_{i,j}$ zu bestimmen. Kennt man zu jedem Ausgabewert zumindest einige mögliche Muster, dann kann man diese Parameter bestimmen, indem man das Netz trainiert, auf die gegebenen Lernmuster mit der gewünschten Reaktion zu antworten.

Die Parameter werden dann in einem iterativen Lernverfahren optimiert. Wird die Güte der Berechnung von außen bewertet, so spricht man vom überwachten Lernen. Alternativ kann man die Bewertung auch durch das Netz selbst vornehmen lassen (Für eine Einführung in die Trainingstheorie verweisen wir auf Winston, 1992, Kapitel 22).

Peer-to-peer Netzwerke Ähnlich den neuronalen Netzen sind *peer-to-peer* Netzwerke ebenfalls Systeme, die aus einer großen Anzahl gleichartiger Elemente bestehen. Peer-to-peer Netzwerke sind Rechnernetze, bei denen alle Rechner gleiche Aufgaben übernehmen, d.h. es gibt keine Trennung zwischen Server- und Client-Rechnern.

Ein Anwendungsgebiet der Peer-to-peer Netzwerke ist der Austausch von Daten (engl. file sharing network). Unter den Protokollen befinden sich das Usenet (das „schwarze Brett“ des Internets), das dem Verteilen elektronischer Massen-Nachrichten dient, und Napster, das im Bereich der Musiktauschbörsen bekannt wurde.

Ziel von Peer-to-peer Netwerken ist es, die lokalen Ressourcen, wie Speicher, Bandbreite oder Rechenzeit, zwischen allen Rechnerknoten aufzuteilen. Dieser verteilte Ansatz erhöht die Robustheit des Netzwerkes, da der Ausfall einiger

Knoten sich nur gering auf die Systemtätigkeit auswirkt, da keine zentralisisierten Datenbestände bestehen und kein *single point of failure* im System existiert. Im Idealfall besitzen Peer-to-peer Netzwerke die Fähigkeit, sich selbst an bestehende Umweltparameter anzupassen (vgl. dazu de Meer und Koppen, 2005).

Evolutionäre Algorithmen Bei vielen Problemen mit hoher Zeitkomplexität, wie beispielsweise dem berühmten *traveling salesman* Problem, ist man in praktischen Algorithmen auf den Einsatz von Heuristiken angewiesen.

Bei Optimierungsproblemen geht es darum, aus einer Menge X ein Element x zu bestimmen, das bezüglich einer Bewertung $v(x)$ für die Menge X maximal ist. Die Menge X ist dabei eine höher-dimensionaler Raum, den vollständig zu durchsuchen aus Komplexitätsgründen, d.h. Zeitmangel nicht möglich ist.

In diesem Fall ist es eine mögliche Heuristik, ausgehend von einer akzeptablen Lösung x diese lokal um δ zu variieren, so dass $x + \delta$ eine bessere Lösung als die alte darstellt, d.h. $v(x) < v(x + \delta)$. Geht man in die Richtung des stärksten Anstiegs, dann spricht man von einem *Gradientenverfahren*. Dies wiederholt man so lange, bis man sich durch lokale Modifikation nicht weiter verbessern kann. Bei einer solchen Approximation der optimalen Lösung besteht die Gefahr, dass man sich in einem lokalen Optimum „verfängt“. Dies geschieht immer dann, wenn jeder Weg zum absoluten Maximum durch ein Minimum führt, da in diesem Fall jeder Weg zum Maximum eine lokale Verschlechterung bedeutet, weswegen ein solcher Pfad von der Heuristik verworfen würde.

Verfahren wie das *simulated annealing* verwenden physikalische Modellvorstellungen, bei denen die Umgebungssuche in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt wird. Ein biologisch motiviertes Verfahren einer solchen Optimierung ist das der Evolutionären Algorithmen (vgl. Eiben und Smith, 2003). Hierbei wird nicht nur eine Approximation $x \in X$ betrachtet, sondern eine gesamte Population $P \subseteq X$ von Lösungen. Die biologische Fitness der Individuen $p \in P$ ist ihre Bewertung $v(p)$. In Anlehnung an die Evolutionslehre Darwins bietet eine höhere Fitness eine höhere Vermehrungswahrscheinlichkeit, d.h. eine größere Wahrscheinlichkeit, seine Gene an die nächste Generation weiterzugeben. Das Genom eines Individuum ist sein Parametersatz.

Ein Nachkomme k entsteht dadurch, dass zwei Elternlösungen e_1 und e_2 kombiniert werden. Hierzu werden ihre Genome gekreuzt: $k = \text{kreuzen}(e_1, e_2)$. Die Auswahl der Eltern geschieht in Abhängigkeit ihrer biologischen Fitness, so dass angepasste Eltern im Schnitt mehr Kinder haben (survival of the fittest). Daneben verändert sich das Genom mit einer geringen Wahrscheinlichkeit auch durch Mutation.

Genetische Algorithmen bilden eine Unterklasse der evolutionären Algorithmen. Bei den genetischen Algorithmen betrachtet man das Genom als Bit-Vektor: $x \in \{0, 1\}^n$. Das Kreuzen zweier Genome $x = x_1 \cdots x_n$ und $y = y_1 \cdots y_n$ geschieht im einfachsten Fall durch ein sogenanntes *one-point crossover*, bei dem stets zwei Kinder erzeugt werden. Dazu wird ein beliebiger Indexwert l zwischen 1 und n herausgegriffen, die beiden Genome jeweils an diesem Index auseinandergeschnitten und über Kreuz rekombiniert:

$$x_1 \cdots x_l \cdot y_{l+1} \cdots z_n \qquad \text{und} \qquad y_1 \cdots y_l \cdot x_{l+1} \cdots x_n$$

Typischerweise hält man die Population in diesem Modell konstant. Die Population des nächsten Zyklusses setzt sich aus den bestangepasstesten Individuen zusammen. Bei einigen Ansätze werden die Nachfolger nur unter den Nachkommen bestimmt (Komma-Strategie), in anderen Varianten überleben auch die Eltern, wenn sie besser als ihre Nachkommen sind (Plus-Strategie). Für das letztere Verfahren können Individuen beliebig alt werden.

Wird unter der gesamten Population selektiert, so kann sich der Wert v der Individuen nur verbessern. Wird dagegen nur unter den Nachkommen selektiert, so ist eine Verschlechterung möglich, nämlich dann, wenn die Kinder schlechter sind als ihre Eltern. Im Falle der Plus-Strategie kann sich das System in lokalen Maxima fangen. Die Komma-Strategie entkommt lokalen Maxima dagegen leichter, allerdings um den Preis, dass ein einmal gefundenes Maximum möglicherweise verlassen und nie wieder erreicht wird.

Aus diesem Grunde ist es ratsam, Individuen eine einerseits endliche, andererseits aber auch mehrere Generationen überdauernde Lebensdauer zuzubilligen. Hierdurch wird die Gefahr lokaler Maxima verringert, ohne dass evolutionäre Erbe der Vorgängergeneration komplett zu vergessen.

Ameisenkolonien Ameisenkolonien sind ein weiteres Beispiel für ein biologisch inspiriertes Modell. Ameisen besitzen erstaunliche Fähigkeiten des koordinierten Zusammenarbeitens, ohne dass sie sich darüber direkt abstimmen würden. Diese Form der Gruppenintelligenz ist unter dem Stichwort der *swarm intelligence* bekannt geworden. Bekanntestes Phänomen ist die Futtersuche eines Ameisenstaates. Zunächst wandern die Ameisen zufällig umher. Stoßen sie dabei auf eine Futterquelle, so geben sie auf dem Weg zurück in den Bau Duftstoffe ab. Andere Ameisen orientieren sich bei ihrer Wegewahl an der Konzentration der Duftstoffe. Auf diese Art und Weise werden andere Ameisen auf den Pfad gelockt und zur Futterquelle geführt. Da sie auf dem Rückweg ebenfalls Duftstoffe ausstoßen, verstärkt sich diese Route. Existieren mehrere Futterquellen, dann orientieren sich die Ameisen proportional zu den relativen Konzentration.

Da die Duftstoffe sich aber schnell verflüchtigen, werden besonders die kurzen Wege von dieser Rückkopplung betroffen, da die Ameisen einem kurzen Weg schneller bewältigen können und so die Duftstoffe auch schneller wieder auffrischen. Auf diese Art und Weise konvergiert die Wegewahl der gesamten Kolonie zu einem (lokalen) Optimum.

Künstliche Ameisenkolonien (siehe Dorigo und Gambardella, 1997) eignen sich sehr gut, um Lösungen von Optimierungsproblemen zu finden. Der große Vorteil des Ansatzes ist, dass sich die Algorithmen auch im Falle ändernder Umweltbedingungen schnell anpassen, sogar in Echtzeit. Dies ist eine Eigenschaft, die insbesondere für Routenplanung im Internet oder für Straßenverkehrsplanung von Interesse ist.

2.4 Komplexität und Ordnung

Wir fragen uns nun, ob Selbstorganisation messbar ist. Selbstorganisation misst sich am Grad der Strukturiertheit des Systems. Intuitiv liegt Selbstorganisa-

tion dann vor, wenn die Komplexität des Systems zunimmt. Wir betrachten nun verschiedene Formen, die Komplexität eines Systems zu beschreiben. Die Kolmogorov-Komplexität betrachtet den aktuellen Zustand des Systems. Die Fragestellung lautet hier, wie groß die kleinste Beschreibung des Systemzustandes ist. Die Informationstheorie betrachtet den aktuellen Systemzustand im Verhältnis zu allen möglichen Zuständen, die das System im Prinzip einnehmen kann. Die Frage ist hier, wieviel Information dieser Zustand relativ zu anderen trägt. Diese Perspektive ist eng mit der physikalischen Theorie der Thermodynamik verwandt. Unter der Perspektive der Berechnungskomplexität betrachten wir das System als Menge, die es zu erkennen gilt, und wir fragen uns, wie lange ein Algorithmus rechnen muss, um die zur Menge gehörenden Elementen von den anderen zu unterschieden. Es ist also – anders als bei der Kolmogorov-Komplexität – nicht die statische Programmgröße, sondern die dynamischen Berechnungskomplexität entscheidend.

2.4.1 Kolmogorov-Komplexität

Kolmogorov-Komplexität beschäftigt sich mit der Beschreibungsgröße von Zeichenketten (vgl. Li und Vitányi, 1997). Betrachtet man endliche Zeichenketten, so gibt die Beschreibungslänge an, wie sehr die Zeichenkette komprimiert werden kann. Die binäre Zeichenkette

$$w = 011011011011011011011011011011011011011011011011$$

besitzt 48 Zeichen. Dies kann aber komprimiert werden, denn w kann auch als $(011)^{16}$ dargestellt werden, was sich im wesentlichen mit $3 + 5$ Bits darstellen lässt.

Die Fragestellung ist aber auch für unendliche Zeichenfolgen interessant, da für diese stets nur ihre Repräsentation von Interesse ist.

Als Darstellung einer Zeichenfolge w – endlich oder unendlich – bezeichnen wir jedes Computerprogramm, das w auf die Ausgabe schreibt. Das Programm kann in einer Programmiersprache wie Pascal formuliert sein oder durch eine Turing-Maschine mit Ausgabeband. Die *Kolmogorov-Komplexität* $K_U(w)$ ist nun definiert als die Länge der kürzesten Darstellung von w, wobei wir den Darstellungsformalismus U verwenden. Die Wahl des Darstellungsformalismus ist hierbei unwesentlich, denn man kann zeigen, dass sich für zwei Darstellungsformalismen U und V die Kolmogorov-Komplexitäten nur um einen von w unabhängigen Wert unterscheiden, d.h. es gilt $|K_U(w) - K_V(w)| \leq c_{U,V}$.

Da w ja selbst eine Darstellung von w ist, ist für endliche Zeichenketten $w = a_1 \dots a_n$ die Kolmogorov-Komplexität $K_U(w)$ – bis auf eine Konstante – stets kleiner als $|w|$, d.h.

$$K_U(w) \leq |w| + c_U$$

Das Pascal-Programm in Abbildung 2.14 ist ein Beispiel für die Erzeugung eines beliebigen Wortes $w = a_1 \cdots a_n$.

Die Kolmogorov-Komplexität ist ein mathematisches Hilfsmittel, denn $K_U(w)$ ist keine berechenbare Funktion.

Eine Zeichenkette w wird als komprimierbar bezeichnet, wenn ihre Kolmogorov-Komplexität $K_U(w)$ kleiner als w ist. Mit anderen Worten: Für

```
function Print_w is
begin
    print a_1;
    ⋮
    Print a_n;
end
```

Abbildung 2.14: Algorithmus zur Darstellung der Zeichenkette $w = a_1 \cdots a_n$

eine Konstante c gilt $K_U(w) \leq |w| + c$. Nicht komprimierbare Zeichenketten heißen zufällig.

Überraschenderweise sind fast alle Zeichenketten nach dieser Definition zufällig. Betrachten wir binäre Darstellung der Programme. Da die Zahl der Zeichenketten der Länge von höchstens $n-k$ sich als $1+2+2^2+\cdots 2^{n-k} < 2^{n-k+1}$ ergibt, existieren weniger als 2^{n-k+1} verschiedene Programme, die sich mit höchstens $n-k$ Bits beschreiben lassen. Von den 2^n Zeichenketten sind daher nur 2^{n-k+1} komprimierbar. Der Anteil $2^{n-k+1}/2^n = 2^{-k+1}$ ist sehr gering. Für $k = 10$ beträgt er ungefähr ein Promille, d.h. 99,9% aller Zeichenketten sind zufällig.

2.4.2 Informationstheorie nach Shannon

In der Kodierungstheorie geht es um die Umformung von einer formalen Darstellung in eine andere. Typische Beispiel für eine Kodierung ist hier die Umwandlung einer Zahl von der dezimalen in die binäre Darstellung. Formale Darstellungen sind hier Wortmengen über Alphabeten A und B, d.h. endlichen, linear geordneten Mengen von Zeichen. Formal ist eine Kodierung eine injektive Abbildung $c : X \to Y$ mit $X \subseteq A^*$ und $Y \subseteq B^*$.

Die Shannon-Information eines Zeichens $a \in A$ bemisst sich an der relativen Häufigkeit des Vorkommens von a in allen Worten $w \in X$ der Grundmenge. Besitzt das Zeichen $a \in A$ die Auftrittswahrscheinlichkeit $P(a) > 0$, dann ist die die Shannon-Information des Zeichens definiert als:

$$I(a) = \log\left(\frac{1}{P(a)}\right) \tag{2.8}$$

Die Shannon-Information eines Zeichens ist daher umso kleiner, je größer die Auftrittswahrscheinlichkeit $P(a)$ ist. In der deutschen Sprache tritt beispielsweise der Buchstabe e sehr häufig auf. Er besitzt daher eine einen sehr geringen Informationsgehalt. Anders formuliert: Die Information, dass in einem Wort der Buchstabe e vorkommt, sagt kaum etwas über das Wort aus. Wissen wir dagegen, dass in dem Wort der Buchstabe y vorkommt, kommen relativ wenige Worte in Betracht. Der Informationsgehalt des Buchstaben y ist daher sehr hoch.

Will man eine kurze Kodierung erreichen, dann ist es sinnvoll, Zeichen mit niedrigem Informationsgehalt eine kurzen Code zuzuweisen. Dies ist das Prinzip

des Morse-Codes, der beispielsweise das e nur mit einem kurzen Signal (dem „Punkt“) kodiert.

Die *Entropie* ist der mittlere Informationsgehalt aller a:

$$H = \sum_{a \in A} P(a) \cdot I(a) \tag{2.9}$$

Sind alle Zeichen a gleich häufig, dann ist der Informationsgehalt aller Zeichen gleich. Zudem ist die Entropie noch identisch mit dem Informationsgehalt ($n = |A|$):

$$\begin{aligned} H &= \textstyle\sum_{a \in A} P(a) \cdot I(a) = \sum_{a \in A} P(a) \cdot \log\left(\frac{1}{P(a)}\right) = \sum_{a \in A} \frac{1}{n} \cdot \log\left(\frac{1}{1/n}\right) \\ &= n \cdot \tfrac{1}{n} \log(n) = \log(n) = I(a) \end{aligned}$$

Allgemein ist die Entropie H niedriger als dieser Wert.

In der Physik beschreibt die Entropie eines Zustands eine statistische Größe. Im Gegensatz zu den bereits bekannten extensiven Größen von thermodynamischen Systemen, wie Energie U oder Volumen V entzog sich die Entropie zunächst dem Verständnis. Das bekannteste Anwendungsgebiet ist die von Ludwig Boltzmann und James Maxwell begründete Theorie der statistischen Mechanik idealer Gase. Der Mikrozustand des Systems ist klassisch durch Ort q und Impuls p aller Teilchen des Systems definiert. Bei N Teilchen ergibt dies somit einen $6N$-dimensionalen Vektorraum. In der Thermodynamik ist N von der Größenordnung 10^{23}, so dass sich die klassische Behandlung auch praktisch nicht mehr anbietet. Die Entropie ist ein Maß für das Phasenraumvolumen, das von der Trajektorie des Systems (unter der Einhaltung von Zwangsbedingungen bezüglicher der Energie o. ä.) erreicht werden kann. Die Entropie eines makroskopische Zustands ist umso größer, je mehr Mikrozustände ihn bilden können. Betrachten wir beispielhaft ein binäres System (vgl. Kittel und Krömer, 1984, S.27ff). Alle Teilchen können nur zwei Werte annehmen: *spin up* ($\uparrow$) oder *spin down* ($\downarrow$). Sei $N_\downarrow$ die Anzahl der Teilchen mit abwärtsgerichteten Spin und $N_\uparrow$ die Anzahl der Teilchen mit aufwärtsgerichteten Spin. Die Gesamtzahl der Teilchen ist $N = N_\downarrow + N_\uparrow$.

Eine Konfiguration (auch: Ensemble) ist dann beispielsweise $\uparrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow$ mit $N_\uparrow = 4$ und $N_\downarrow = 2$. Die Grundannahme der statistischen Physik ist, dass alle Konfiguration mit gleicher Wahrscheinlichkeit physikalisch realisiert werden können. Für das Binärsystem wird die Differenz

$$N_\uparrow - N_\downarrow = 2s$$

als Spinüberschuß bezeichnet. Dieser Wert bestimmt das gemeinsame magnetische Moment, das sich zu $2sm$ ergibt, wenn m das Moment jedes Einzelspins ist. In einem äußeren Magnetfeld bestimmt das gemeinsame Moment die Energie der Konfiguration.

Die *Entartungsfunktion* $g(N, s)$ gibt die Anzahl aller Konfiguration von N Teilchen an, die den Spin-Überschuß s besitzen. Es gilt:

$$g(N, s) = \frac{N!}{N_\uparrow! \cdot N_\downarrow!}$$

Für große N konvergiert die Binomialverteilung gegen die Gaußverteilung:

$$g(N,s) \approx g(N,0)e^{-2s^2/N}$$

mit $g(N,0) \approx \sqrt{2/\pi N} \cdot 2^N$. Die Gaußkurve ist dabei sehr eng um den Mittelwert $s = 0$ verteilt, da sich mit $\sigma^2 = 1/2N$ die Streuung der Verteilung zu $\sigma = \sqrt{1/2N}$ ergibt. Diese ist für $N = 10^{22}$ – die Größenordnung für die Teilchenanzahl in einem Liter Gas – von der Größenordnung 10^{-11}. Also ist der Mittelwert sehr scharf. Aus diesem Grund ist es für Gase angemessen, statistische Größen zu betrachten.

Betrachten wir zwei zunächst getrennte Systeme, die wir in Kontakt bringen. Die Einzelsysteme sind zunächst jeweils im Gleichgewicht. Bringen wir die beiden Systeme in Kontakt, dann ist das Gesamtsystem dies nicht mehr. Es strebt jetzt wieder auf eine Gleichgewichtskonfiguration hin. Die gemeinsame Entartungsfunktion $g(N,U)$ – formuliert als Funktion der Teilchenanzahl $N = N_1 + N_2$ und der Energie U – ergibt sich als die Faltung:

$$g(N,U) = \sum_{0 \le U_1 \le U} g_1(N_1,U_1)g_2(N_2,U-U_1)$$

Das System hat durch den Kontakt die Möglichkeit zur Zustandsänderung bekommen. Hatten wir nämlich zu Beginn zwei Zwangsbedingungen: $U_1 = const$ und $U_2 = const$, so ist es nach dem Kontakt nur noch eine: $U_1 + U_2 = const$.

Nach einem Abgleich beider Systeme entsteht ein Gleichgewichtszustand, der dadurch gekennzeichnet ist, dass sich die Energietransfers von einem System in das andere ausgleichen:

$$\mathrm{d}\,U_1 + \mathrm{d}\,U_2 = 0$$

Der Gleichgewichtszustand des Gesamtsystems ist der wahrscheinlichste Wert, d.h. wir suchen das Maximum von $g(N,U)$. Dazu muss die erste Ableitung verschwinden:

$$\mathrm{d}\,g = \frac{\partial g_1}{\partial U_1} g_2\,\mathrm{d}\,U_1 + g_1 \frac{\partial g_2}{\partial U_2}\,\mathrm{d}\,U_2 = 0$$

Dies können wir mit $\mathrm{d}\,U_1 + \mathrm{d}\,U_2 = 0$ und $\frac{1}{f}\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial \ln(f)}{\partial x}$ umformen:

$$\frac{1}{g_1}\frac{\partial g_1}{\partial U_1} = \frac{1}{g_2}\frac{\partial g_2}{\partial U_2} \iff \frac{\partial \ln g_1}{\partial U_1} = \frac{\partial \ln g_2}{\partial U_2}$$

Die Größe $\sigma(N,U) := \ln g(N,U)$ wird als *Entropie* definiert. Die logarithmische Skala hat den Vorteil, dass die Entropie zweier unabhängiger Systeme gleich der Summe ihrer Einzelentropien ist. Die Skala ist in Energieeinheiten definiert. Um zu den Einheiten der klassischen Thermodynamik, der Kelvinskala, zu gelangen, wird noch die Boltzmannkonstante k hinzugefügt:

$$S := k \cdot \ln g(N,U) \tag{2.10}$$

Die Bedingung für den Gleichgewichtszustand lauten dann:

$$\frac{\partial S_1}{\partial U_1} = \frac{\partial S_2}{\partial U_2} \tag{2.11}$$

Man kann nachrechnen, dass sich durch den thermischen Kontakt der beiden Systeme die Entropie erhöht. Dies ist als der *2. Hauptsatz der Thermodynamik* bekannt: Befindet sich ein abgeschlossenes Systems nicht in der der Gleichgewichtskonfiguration, so ist die wahscheinlichste Konsequenz, dass die Entropie monoton zunimmt. Die Entropie nimmt zu, wenn innere Zwangsbedingungen aufgehoben werden.

Im Gleichgewichtszustand besitzt die Entartung $g(N, U)$ und damit auch die Entropie ein Maximum. Dieser Zustand etspricht der minimalen Information, denn er entspricht der wahscheinlichsten Konfiguration. Die äußerst unwahscheinlichste Konfiguration, in der sich alle Teilchen energetisch wieder in ihre Anfangszustände U_1 und U_2 getrennt haben, trägt dagegen eine sehr hohe Information. Dies zeigt schön die Parallelen zur Shannon-Information in der Kodierungstheorie.

2.4.3 Algorithmische Komplexitätstheorie

Komplexitätstheorie ist ein Bestandteil der Berechbarkeitstheorie. Die zentrale Frage ist jetzt nicht mehr, ob eine Menge L von einer Turing-Maschine M erkannt wird, sondern mit welchem Aufwand. Die elementaren Beschreibungsmaße für den Akzeptierungaufwand sind hierbei die Zeit- und die Platzkomplexität.

Die Zeitkomplexität $t_M(n)$ ist als die maximale Zahl von Berechnungsschritten definiert, die eine Turing-Maschine M benötigt, um ein Wort w der Länge n zu erkennen. Die Formulierung bezieht sich auf das Maximum, da es im allgemeinen mehrere Worte der Länge n gibt. Die Platzkomplexität $s_M(n)$ ist als die maximale Zahl Bandfeldern definiert, auf denen M arbeitet, um ein Wort w der Länge n zu erkennen.

Man beachte, dass eine Platz-beschränkte Turing-Maschine eine sehr große Zeitkomplexität besitzen kann. Genauer: Eine Turing-Maschine mit der Platzkomplexität $s_M(n)$ kann exponentiell lange rechnen, da auf den $s_M(n)$ alle Bandsymbole möglich sind, so dass sich für $m = |\Gamma|$ viel Bandsymbole mindestens $m^{s_M(n)}$ unterschiedliche Konfiguration ergeben, die die Turing-Maschine M bis zur Termination alle durchlaufen könnte.

In der Komplexitätstheorie haben es die beiden Klassen $\mathcal{P}$ und $\mathcal{NP}$ zur Berühmheit gebracht. Die Klasse $\mathcal{P}$ enthält alle Sprachen, die von einer deterministischen Turing-Maschine (DTM) in polynomieller Zeit erkannt werden können, die Klasse $\mathcal{NP}$ enthält alle Sprachen, die von einer nicht-deterministischen Turing-Maschine (NTM) erkannt werden.

$$\begin{aligned} \mathcal{P} &= \{L(M) \mid \exists \text{ Polynom } p(n), \exists \mathbf{DTM}\ M : t_M(n) = p(n)\} \\ \mathcal{NP} &= \{L(M) \mid \exists \text{ Polynom } p(n), \exists \mathbf{NTM}\ M : t_M(n) = p(n)\} \end{aligned}$$

Da nach Definition jede deterministische Turing-Maschine auch ein Spezielfall der nicht-deterministischen Turing-Maschine ist, gilt damit sofort $\mathcal{P} \subseteq \mathcal{NP}$. Die Frage, ob die Inklusion echt ist, d.h. ob $\mathcal{P} \subset \mathcal{NP}$ gilt, oder ob sie gleich sind, d.h. ob $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$ gilt, hat besondere praktische Auswirkung. Es gibt viele Probleme, für die es sehr leicht ist, für einen geratenen Ansatz zu überprüfen, ob er eine Lösung des Problems darstellt. Leicht heißt in diesem Fall, dass die Überprü-

fung deterministisch in Polynomzeit erfolgt. Aus diesem Grund kann eine nicht-deterministische Maschine Probleme dieser Art besonders leicht lösen, indem sie einfach nicht-deterministisch einen Lösungsansatz rät und ihn anschließend deterministisch überprüft. Da eine nicht-deterministischen Turing-Maschine alle Lösungsansätze gleichzeitig betrachtet, kann dieser Ansatz nur dann fehlschlagen, wenn es überhaupt keine Lösung gibt. Eine deterministische Maschine kann dagegen stets nur einen Ansatz zur Zeit überprüfen. Ihre Laufzeit wächst also mit der Anzahl der möglichen Lösungen.

Das bekannteste Beispiel für ein solches Problem ist das *Erfüllbarkeitsproblem* für aussagenlogische Formeln, kurz: SAT (engl. satisfiability problem). Eine aussagenlogische Formeln ist eine Ausdruck, der über einer Menge von Variablen $X = \{x_1, x_2, \ldots\}$ gebildet wird. Die Menge aller Formeln BE_X ist induktiv definiert:

- Jede Variable $x \in X$ ist eine aussagenlogische Formel.
- Wenn P eine aussagenlogische Formel ist, dann auch $\neg P$.
- Wenn P und Q aussagenlogische Formel sind, dann auch $(P \wedge Q)$ und $(P \vee Q)$.

Eine Variablenbelegung $\alpha : X \to \{f, t\}$ weist jeder Variable entweder den Wert *wahr* (t) oder *falsch* (f) zu. Jede Variablenbelegung α erweitert sich dann rekursiv zu einer Auswertung auf den Formeln:

$$\bar{\alpha} : BE_X \to \{f, t\}$$

Eine Formel P heißt erfüllbar (engl. satisfiable), wenn es mindestens eine Variablenbelegung $\alpha : X \to \{t, f\}$ gibt, so dass $\bar{\alpha}(P) = t$ gilt. Für das Erfüllbarkeitsproblem ist für eine gegebene Formel P zu entscheiden, ob sie erfüllbar ist.

Offensichtlich ist SAT in $\mathcal{NP}$ enthalten, denn wir können eine nicht-deterministische Turing-Maschine M mit $L(M) = \text{SAT}$ konstruieren, die in polynomieller Zeit akzeptiert. Dazu rät M eine Variablenbelegung α für jede Variable, die in P vorkommt, denn nur diese sind relevant. Dies ist in linearer Zeit möglich. In der zweiten Phase evaluiert M deterministisch $\bar{\alpha}(P)$ und akezeptiert, falls $\bar{\alpha}(P) = t$. Dies kann in $t(n) = n^4$, d.h. in polynomieller Zeit geschehen. Damit verneint M die Erfüllbarkeit von P nur, wenn es gar keine erfüllende Belegung gibt, d.h. wenn P unerfüllbar ist.

Der bemerkenswerte Punkt liegt in der Möglichkeit der nicht-deterministischen Turing-Maschine, alle möglichen Belegungen gleichzeitig zu betrachten. Eine deterministische Turing-Maschine kann dies nicht. Wollen wir das Raten simulieren, dann müssen wir alle möglichen Belegungen sequentiell testen. Dies ist jedoch mit einem großen Aufwand verbunden, denn wenn die Formel n Variablen besitzt, dann existieren 2^n verschiedene Belegungen, die zu testen sind. Die Berechnungsdauer wächst somit exponentiell mit der Anzahl der Variablen. Dies bedeutet, dass jede hinzugefügte Variable die Berechnungszeit verdoppelt. Exponentielles Wachstum ist daher enorm. Schon

bei einer Größenordnung von $n = 3000$ übersteigt 2^n die Anzahl der Atome im Universum, die von der Größenordnung 10^{1080} ist.

Es ist daher von besonderer Bedeutung, ob es eine bessere Methode gibt, d.h. einen polynomiellen Algorithmus, der SAT löst. Dies ist aber sehr unwahrscheinlich, da SAT ein $\mathcal{NP}$-vollständiges Problem ist, was heißt, dass jedes Problem in $\mathcal{NP}$ einen polynomiellen Algorithmus besitzt, wenn SAT polynomieller Zeit gelöst werden könnte. Dies heißt aber nichts anderes als $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$, was als sehr unwahrscheinlich gilt.

Weitere genauso schwere Probleme finden sich im Bereich der Optimierung. Die ganzzahlige lineare Programmierung, die für die unternehmischere Planung (engl. operations research) eine wichtige Rolle spielt, fällt in diese Klasse.

Auch ist das Problem, in einem gegeben Graphen einen Kreis zu finden, der alle Knoten enthält, genauso schwer wie SAT. Stellt man sich die Knoten als Städte und die Kanten als Straßen vor, so verlangt dieses Problem anschaulich, eine Stadtrundfahrt zu konstruieren. Es ist daher auch als Problem des Handlungsreisenden (engl. travelling salesman) bekannt. Dieses Problem hat sogar die Eigenschaft, nicht einmal gut approximierbar zu sein, d.h. es gibt keinen polynomiellen Algorithmus, der eine näherungsweise optimale Lösung berechnen kann – es sei denn $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$.

2.5 Emergenz und Reduktionismus

Wir fragen uns nun, ob sich emergente Systemphänomene dem analytischen Reduktionsprinzip entziehen. Der in diesem Zusammehang gern zitierte Ausspruch „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ lässt sich zumindest nicht mit dem Hinweis auf chaotische Systeme rechtfertigen, denn diese Systeme sind deterministisch, d.h. ihr Verhalten ist durch die Anfangsbedingungen eindeutig festgelegt. Viele als emergent klassifizierte Eigenschaften entpuppen sich als Wechsel der Beschreibungsebenen.[6] Es gibt jedoch komplexitätstheoretische Einschränkungen, denn nicht immer ist eine mathematisch exakt definierte Lösung auch einfach zu berechnen.

Emergenz ist ein Begriff, der u.a. in der Physik, der Biologie und auch in der Soziologie verwendet wird.

> [T]he organisation is intrinsic to the self-organising system and results from internal constraints or mechanisms, due to local interactions between its components. [...] In fact, from these inteactions, emergent properties appear transcending the properties of all individual sub-units of the system. (Serugendo u. a., 2004, S. 2)

Eine Eigenschaft eines Systems ist *emergent*, wenn sie sich nicht als Summe der Eigenschaften der Teile darstellen lässt. An dieser Stelle ist es notwendig, auf

[6] So besitzen weder Wasserstoff noch Sauerstoff die Qualität, flüssig zu sein, während ihrer Kombination, dem Wasser, diese zukommt. Dies ist aber auch nicht überraschend, da einzelnen Atomen oder Molekülen die Qualität, flüssig zu sein, nicht zukommt. Diese Qualität ist erst auf Ensembles anwendbar.

die Definition im Detail einzugehen, insbesondere auf die Formulierung „als Summe von Eigenschaften“. Emergente Eigenschaften eines Systems lassen sich sehr wohl als *Kombination* der Eigenschaften der Teile darstellen, jedoch nicht als lineare Kombination, d.h. nicht als Summe. Oder positiv formuliert: Emergente Eigenschaften lassen sich nicht als lineare Kombination (auch als *Superposition* bekannt) der Teile darstellen.[7]

Abweichend von dieser Verwendung des Begriffes wird in sozialwissenschaftlicher Literatur emergentes Verhalten teilweise synonym mit dem unerwarteten Erscheinen einer Systemeigenschaft gleichgesetzt. Emergenz ist also kein Attribut der Erscheinung selbst, sondern ein Attribut der Relation von Erwartung und Erscheinung. Die Betonung liegt meist auf der Seite des Erwartenden und weniger auf der der Erscheinung. Emergent sind Erscheinung beispielsweise, weil die Erscheinung und ihre Genese nicht im Aufmerksamkeitfokus gelegen haben oder weil die Vielzahl der möglichen Entwicklungen mit ihren Unwägbarkeiten eine Prognose durch den Beobachter verhinderte.

Neben diesen praktisch relevanten Varianten der Emergenz bestehen aber noch Formen, die ihren Ursprung nicht im Beobachter, sondern in der Erscheinung selbst haben.

2.5.1 Emergenz und thermodynamisches Gleichgewicht

In ähnlicher Weise wie die Systemtheorie wurde die Thermodynamik durch die Betrachtung von Systemen nahe des Gleichgewichtszustandes dominiert, mit der Konsequenz, dass Ordnungsbildungsprozesse, die im allgemeinen fernab des Gleichgewichtszustandes entstehenden, nicht früher Beachtung fanden. In den frühen 60er untersuchte der Chemiker Ilya Prigogine Ordnungsbildung in dissipativen Strukturen[8]. Er behandelte das Phänomen, indem er die Theorie irreversibler Prozesse auch auf Systeme fernab vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand fortentwickelte. Auch zeigen die untersuchten Strukturen Effekte der *Pfadabhängigkeit*, d.h. nicht der momentane Zustand bestimmt die weitere Entwicklung, sondern die gesamte Historie (der Entwicklungspfad). Die Systeme besitzen ein Gedächtnis. Diese Theorie erklärte, wie mikroskopische Fluktuationen, seien es Umweltstörungen oder Eigenfluktuationen des Systems, zu einem neuen makroskopischen Zustand führen. Ein solches Phänomen tritt im Falle von Systemen nahe des thermodynamischen Gleichgewichtszustands nicht auf. Hier gleichen die mikrospischen Schwankungen einander im Mittel aus. Fernab des Gleichgewichtzustandes sorgen jedoch nichtlineare Effekte dafür, dass mikro-

[7] Andere Autoren verzichten in ihrer Verwendung auf den Verweis auf nichtlineare Eigenschaften, sondern gehen von einer prinzipiellen Unmöglichkeit der Reduktion auf Teileigenschaften aus. Damit wird der Erklärungsgegenstand einem analytischen Zugang entzogen. Emergenz als Fluchtbegriff deutet – nach Aufassung des Autors – jedoch zumeist mehr auf Theoriedefizite als auf die Nichterklärbarkeit hin.

[8] Ein System heißt dissipativ, wenn ihm kontinuierlich Energie entzogen wird, so dass es nur durch die Aufnahme von Energie erhalten bleibt. Ein Beispiel für ein dissipatives System ist die gedämpfte Schwingung. In der Thermodynamik werden Arbeiten, die dem System nur zugeführt werden, d.h. irreversible Arbeiten, im allgemeinen als Dissipationsarbeiten bezeichnet. Es ist eine wegabhängige Prozessgröße.

skopische Fluktuationen einander verstärken und so dem System eine Dynamik auf der makroskopischen Ebene geben.

Eine in diesem Zusammenhang vielfach geäußerte, aber dennoch unzutreffende Behauptung ist es, dass die Selbstorganisation komplexer Systeme durch die Physik nicht erklärbar ist, da sie dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik widerspreche.[9] Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass in einem *geschlossenen* System, d.h. in einem System ohne Energieaustausch mit der Umgebung, die Entropie nicht abnehmen kann. Sie kann im Falle reversibler Prozesse gleich bleiben (isentrope Prozesse) oder zunehmen. In geschlossenen Systemen führt die Entropiezunahme dazu, dass sich das System zu einem Gleichgewichtzustand hin entwickelt. Das Standardbeispiel ist in diesem Zusammenhang ein isolierter Behälter, mit einer Trennvorrichtung in der Mitte. Initial befindet sich ein Gas ausschließlich in der linken Hälfte des Behälters. Das System präpariert mit seiner Anordnung der Moleküle eine höchst unwahrscheinliche Konstellation. Entfernt man die Barriere zwischen linker und rechter Hälfte, so verteilt sich sich das Gas solange, bis es einen Gleichgewichtzustand erreicht hat, für den sich in beiden Hälften gleiche Anzahlen an Molekülen befinden. Im Gleichgewichtszustand finden weiterhin Austauschbeziehungen von links nach rechts und umgekehrt statt. Diese haben jedoch keinerlei Auswirkungen auf die Vetreilung, da im statistischen Mittel jeglicher Austausch von links nach rechts durch einen gleichzeitig in der anderen Richtung stattfindenen Prozess kompensiert wird.

Diese Entwicklung hin zu einem Gleichgewichtszustand führte im 19. Jahrhundert zur Prognose des *Wärmetods* unseres Universums. Geht man davon aus, dass es sich beim Universum um ein geschlossenes System handelt,[10] strebt es einem Gleichgewichtszustand entgegen, in dem alle Energie in Form von Wärme vorliegt und Leben, in welcher Form auch immer, nicht mehr möglich ist.

Geht man von dieser Vorstellung aus, so erscheint Strukturbildung, insbesondere das Leben als solches mit der Physik nicht vereinbar. Doch gilt dies – wie bereits erwähnt – nur für geschlossene Systeme. Offene Systeme können hingegen Entropie erzeugen. „Jede zeitliche Entropieänderung kann in zwei Arten von Beiträgen zerlegt werden: den *Entropiefluß*, der auf dem Austausch des Systems mit seiner Umgebung beruht, und die *Entropieerzeugung*, die aus den irreversiblen Prozessen innerhalb des Systems resultiert. Der Zweite Hauptsatz postuliert, daß die Entropieerzeugung positiv ist oder im Gleichgewicht verschwindet. Für den Entropiefluß stellt er keine Bedingung. Im stationären Zustand wird die positive Entropieerzeugung durch einen negativen Entropiefluß kompensiert; die fortgesetzte Entropie erzeugende Aktivität wird durch Austauschprozesse mit der Umgebung aufrecht erhalten. Der Gleichgewichtszustand entspricht jenem

[9] So schreibt Wilke im Lehrbuch zur soziologischen Systemtheorie zumindest etwas missverständlich: „Statt dessen trotzen Organismen dem Zweiten thermodynamischen Hauptsatz und produzieren Ordnung statt Entropie. [...] und dass diese organisierte Komplexität Gesetzmäßigkeiten aufweist, *welche sich nicht auf die Gesetze der Physik reduzieren lassen*, dies gibt den Wissenschaften und der Theorie lebender Systeme ihre besondere Bedeutung.“ (Willke, 1982, S.129, Hervorhebung durch den Autor, M. Köhler)

[10] Eine Annahme, die aufgrund der kosmologischen Expansion nicht zwingend ist.

Sonderfall, indem sowohl Entropiefluß als auch Entropieerzeugung gegen Null streben.“ (Prigogine und Stengers, 1993, S.77f)

2.5.2 Emergenz versus Reduktionismus

Für ein System, dessen Elemente und Wechselwirkungsformen bekannt sind, ist die Dynamik exakt festgelegt. Definiert man die Dynamik eines Systems als die Extension seiner Beschreibung, so ist jede Dynamik analytisch im Systembegriff enthalten. Es ist jedoch fraglich, ob sich aus dieser Form des Reduktionismus auch eine Prognosemöglichkeit ergibt. Wie wir bereits gesehen haben hängt die Dynamik nichtlinearer Systeme empfindlich von den Anfangswerten ab, so dass jede Messungenauigkeit sich auf die Prognose der Mikrovariablen auswirkt. Da in praktischen Fällen die Anfangswerte gemessen werden müssen, hat es keinen Sinn, die Dynamik von Mikrovariablen zu betrachten, so dass man stattdessen auf Makrovariablen, d.h. auf Ensemble-Eigenschaften, ausweicht, da diese oftmals prognostizierbar sind.

Neben dieser praktischen Einschränkung gibt es auch noch eine, die mit dem Prognosebegriff gekoppelt ist. Ein Systemmodell hat nämlich nur dann Prognosequalität, wenn wir ausgehend vom jetzigen Zustand zum Zeitpunkt t_0 einen zukünftigen Zustand zum Zeitpunkt t ausrechnen können, ohne seine Dynamik von t_0 bis t nachzuvollziehen zu müssen, denn müssten wir dies tun, so würde unsere „Prognose“ für t erst dann berechnet sein, wenn wir bereits den Zeitpunkt t erreicht hätten. Mit anderen Worten: Wir könnten genausogut abwarten und zuschauen, wie sich das System entwickelt.[11] Um dies zu illustrieren, betrachten wir ein System, das durch Rekurrenzgleichung definiert ist, hier das klassische Beispiel der Fibounacci-Zahlen:

$$f(t+2) = f(t+1) + f(t), \quad f(1) = 1, \quad f(0) = 0$$

Die Zahlenreihe ist ein Wachstumsmodell, das die Vermehrung von Hasenpopulationen beschreiben sollte. Mit dieser rekursiven (bzw. iterativen) Darstellung sind alle Fibounacci-Zahlen definiert. Allerdings nützt dies nicht viel, sofern ich zur Berechnung von $f(1000)$ alle Werte $f(0)$ bis $f(999)$ berechnen müsste. Wäre dies so, dann würde ich das System gewissermaßen simulieren müssen, um Voraussagungen treffen zu können.

Man kann argumentieren, dass in diesem Fall keine Prognosemöglichkeit besteht, da die einzige Möglichkeit einer Prognose der Systemdynamik darin besteht, die Systemwerte $f(t)$ iterativ zu berechnen. Da die iterative Berechnung de facto eine Simulation des Systems darstellt, wäre die einzige Möglichkeit zur Prognose die Simulation, und es ist fraglich, ob man hierfür den Begriff der Prognose anwenden sollte. Glücklicherweise kann man für dieses Beispiel zeigen, dass der Rückgriff auf die Werte $f(0)$ bis $f(999)$ nicht notwendig ist, denn es

[11] In diesen Überlegungen abstrahieren wir von konkreten Rechengeschwindigkeiten. Diese ist zwar in konkreten Fällen wichtig: „Was nützt mir der Wetterbericht für morgen, wenn ich ihn erst in einer Woche weiß?“ Solche Probleme sind mit einer Beschleunigung um konstante Faktoren lösbar. Die hier angestellten Überlegungen informationstechnischer Natur sind jedoch unabhängig von konstanten Faktoren.

gilt:

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{5}}\phi_1^n + \frac{1}{\sqrt{5}}\phi_2^n \quad \text{mit } \phi_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$$

Wir besitzen also eine explizite Darstellung der Fibounacci-Zahlen und können daher Prognosen vornehmen.

Man beachte, dass es sich hierbei um kein Machbarkeits-, sondern um ein Komplexitätsargument handelt. Es ist nicht so, dass uns zu wenig Rechenleistung zur Verfügung steht, sondern es ist so, dass die Dynamik sich vom informatisch theoretischen Standpunkt u.U. nicht kompakter darstellen lässt als durch die Dynamik selbst. Eine solche Dynamik ist im Sinne der Kolmogorov-Komplexität inkrompressibel.

2.6 Selbstordnung und Synergetik

Wie Bifurkationsphänome zeigen, ist es möglich, ein System anhand der Variation eines Parameters komplett zu reorganisieren. Für eine ganze Klasse von Systemen können sogar Ordnungsparameter identifiziert werden, die die Dynamik des ganzen Systems regeln. Fazit: Autonomie schließt Steuerbarkeit nicht aus.

Komplexe Dynamiken entstehen durch Rückkopplung. Selbstorganisation entsteht in der Regel durch das Vorhandensein positiver wie negativer Rückkopplung. Die *Synergetik* („Die Lehre vom Zusammenwirken“) ist eine mathematisch-physikalische Behandlung von Systemen, deren Dynamiken miteinander wechselwirken. Der Begründer der Synergetik, Hermann Haken, entwickelte die Theorie unsprünglich zur mathematischen Beschreibung des Laserlichts (Laser steht kurz für „light amplification by stimulated emission of radiation“). Laserlicht ist ein monochromatischer Wellenzug hoher Kohärenzlänge.[12] Während sich mit Hilfe der Theorie der stimulierten Emmission von Photonen ergibt, warum der Wellenzug des Lasers monochromatisch ist, war es lange unklar, wie die Kohärenz zustande kommt. Haken gelang eine mathematische Behandlung, die erklärt, wie die Elektronen des Lasers dies leisten, indem er zeigt, dass die Wechselwirkung eine minimale „Dominanz“ einer Mode, d.h. eines Anregungszustandes, verstärkt und zugleich dafür sorgt, dass sich alle weiteren Moden an die Schwingung der einen anpassen. Haken spricht in diesem Zusammenhang von einer „Versklavung“ der Moden durch die dominate. Wir geben im folgenden die Grundlinien der Theorie der Ordnungsparameter nach (Haken, 1990) wider.

2.6.1 Die adiabatische Näherung

Wir betrachten Systeme, die folgenden Bedingungen genügen.

1. Der Effekt q ist proportional zu Zeitveränderung Δt und der externen Ursache, z.B. der äußeren Kraft F_0:

$$\dot{q}(t) = F_0(q(t), t)$$

[12] Laserlicht besitzt eine Kohärenzdauer in der Größenordnung einer Sekunde, was die von Tageslicht um sechs Größenordnungen übertrifft.

In der Chemie kann F als Konzentration der Reaktanden gedeutet werden, für die Beschreibung von Populationsdynamiklen als Nahrungsnachschub.

2. Ohne Einwirkung der äußeren Kraft ergibt sich keine Wirkung:

$$F_0 \to 0 \Longrightarrow q \to 0$$

Das System ist somit stabil und gedämpft.

Ein Beispiel für diese Systemklasse ist folgende Differentialgleichung:

$$\dot{q}(t) = -\gamma q(t) + F(t)$$

Die Lösung der Differentialgleichung ergibt sich (unter Vernachlässigung der Einschwingphase) zu:

$$q(t) = \int_0^t e^{-\gamma(t-\tau)} F(\tau)\, \mathrm{d}\,\tau$$

Man erkennt, dass die Reaktion $q(t)$ des Systems von der gesamten Vorgeschiche der Ursache abhängt, d.h. vom Verlauf $F(0)$ bis $F(t)$. Das System besitzt also Pfadabhängigkeit.

Die Frage ist, unter welchen Bedingungen das System instantan auf die Ursache reagiert, d.h. wann $q(t)$ direkt von $F(t)$ abhängig ist. Wir wählen dazu den Ansatz:

$$F(t) = ae^{-\delta t}$$

Eingesetzt in die Lösung $q(t)$ der Differentialgleichung ergibt sich:

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_0^t e^{-\gamma(t-\tau)} a e^{-\delta\tau}\, \mathrm{d}\,\tau = ae^{-\gamma t} \int_0^t e^{(\gamma-\delta)\tau}\, \mathrm{d}\,\tau = \tfrac{ae^{-\gamma t}}{\gamma-\delta} \left[e^{(\gamma-\delta)\tau}\right]_0^t \\ &= \tfrac{ae^{-\gamma t}}{\gamma-\delta}(e^{(\gamma-\delta)t} - 1) = \tfrac{a}{\gamma-\delta}(e^{-\delta t} - e^{-\gamma t}) \end{aligned}$$

Das System reagiert instantan, wenn $\gamma \gg \delta$ gilt, da in diesem Fall die Näherungen $\gamma - \delta \approx \gamma$ und $e^{-\delta t} - e^{-\gamma t} \approx e^{-\delta t}$ gelten. Dann folgt die instantane Reaktion:

$$q(t) \approx \frac{a}{\gamma}(e^{-\delta t}) = \frac{1}{\gamma} F(t)$$

Die Näherung $\gamma \gg \delta$ für die Raten ist aquivalent zur Näherung $\frac{1}{\gamma} \ll \frac{1}{\delta}$ für die Zeitkonstanten, d.h. die Zeitkonstante des Systems $\frac{1}{\gamma}$ ist viel kürzer als die Zeitkonstante der externen Ursache $\frac{1}{\delta}$. Diese Näherung heißt *adiabatische Näherung*.

Man beachte, dass wir das gleiche Ergebnis für $q(t)$ erhalten, wenn wir näherungsweise $\dot{q} = 0$ setzen:

$$\dot{q}(t) = 0 = -\gamma q(t) + F(t) \iff q = \frac{1}{\gamma} F(t)$$

2.6.2 Einfaches rückgekoppeltes System

Als Erweiterung der Betrachtung wird im folgenden angenommen, dass die externe Ursache ein Systembestandteil und so auch Teil der Bewegungsgleichungen ist.

Betrachten wir die Kombination aus Kraft $F = bq_1$ und dem Untersystem q_2:

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 q_1 - a q_1 q_2 \tag{2.12}$$
$$\dot{q}_2 = -\gamma_2 q_2 + b q_1 q_1 \tag{2.13}$$

Wieder treffen wir die Annahme, dass das Untersystem (2.13) gedämpft ist, sobald die Kraft verschwindet. Da aus $q_1 \to 0$ die Näherung $\dot{q}_2 = -\gamma_2 q_2$ mit der Lösung $q_2 = e^{-\gamma_2 t}$ folgt, kann das Untersystem nur für $\gamma_2 > 0$ stabil sein.

Die adiabatische Näherung lautet für das gekoppelte System $\gamma_2 \gg \gamma_1$, d.h. das Untersystem ist viel stärker gedämpft als die externe Ursache. Die adiabatische Näherung rechtfertigt die Näherung $\dot{q}_2 \approx 0$. Setzen wir dies in (2.13) ein, erhalten wir:

$$q_2(t) = \frac{1}{\gamma_2} b q_1^2(t) \tag{2.14}$$

Aus Gleichung (2.14) ist abzulesen, dass das Untersystem q_2 der Kraft q_1 folgt. Mit anderen Worten: „Das System (2.12) für q_1 versklavt (2.13) für q_2." Haken fasst diese Abhängigkeit in folgendem Motto zusammen:

> Langlebige Systeme versklaven kurzlebige.

Mit (2.14) kann (2.12) weiter vereinfacht werden:

$$\dot{q}_1(t) = -\gamma_1 q_1(t) - \frac{ab}{\gamma_2} q_1^3(t) \tag{2.15}$$

Diese Gleichung beschreibt das System des anharmonischen Oszillators. Wie aus der dortigen Betrachtung bekannt ergeben sich in Abhängigkeit des Vorzeichens von γ_1 zwei qualitativ unterschiedliche Verhaltensweisen des Systems.

1. Falls $\gamma_1 > 0$, so ist $q_1 = 0$ der einzige stabile Punkt. Mit (2.14) folgt dann auch $q_2 = 0$.

2. Falls $\gamma_1 < 0$, so liegen drei Lösungen vor. Dabei ist $q = 0$ ein instabiler Punkt und $q_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{|\gamma_1|/\gamma_2}{ab}}$ sind stabile. Mit (2.14) folgt für das Untersystem auch $q_2 \neq 0$.

Das aus (2.12) und (2.13) bestehende System hat somit entschieden, den Effekt q_2 zu erzeugen. Da die Wahl zwischen $q_1 = 0$ und $q_1 \neq 0$ ein Maß dafür ist, ob die Wirkung q_2 auftritt, könnte q_1 als *Wirkungsparameter* bezeichnet werden. Im Rahmen der sich aus der Laserphysik abgeleiteten Synergetik erweist sich q_1 auch als Maß für die Ordnung des Systems und wird demzufolge als *Ordnungsparameter* bezeichnet.

2.6.3 Mehrere Untersysteme

Wir betrachten im folgenden ein System bestehend aus n gekoppelten Systemen.

$$\begin{aligned} \dot{q}_1(t) &= -\gamma_1 q_1(t) + g_1(q_1, \ldots, q_n) \\ &\vdots \\ \dot{q}_n(t) &= -\gamma_n q_n(t) + g_n(q_1, \ldots, q_n) \end{aligned} \tag{2.16}$$

Wir nehmen im folgenden eine Unterteilung der Moden[13] aus (2.16) mit Index $j \in \{1, \ldots, n\}$ in zwei Gruppen.[14]

1. Der Index $i \in \{1, \ldots, m\}$ bezeichnet die Moden geringer Dämpfung, die instabil werden, d.h. $\gamma_i \leq 0$ (auch als *Ordner* bezeichnet).

2. Der Index $s \in \{m+1, \ldots, n\}$ bezeichnet die stabilen Moden starker Dämpfung, d.h. $\gamma_s > 0$.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Ordner – im Gegensatz zum Alltagsverständnis – nicht die stabilen, sondern gerade die instabilen Moden sind. Dies liegt daran, dass Ordner eine langlebige, da kaum gedämpfte Dynamik besitzen, während die versklavten Systeme stark gedämpft, also stabil sind.

Um das System zu analysieren, treffen wir folgende Annahmen:

1. Die g_j sind nichtlineare Funktionen der $q_1, \ldots, q_n$, d.h. sie enthalten keine Konstanten oder lineare Glieder.

2. Für die stabilen Moden gilt die adiabatische Näherung: $\dot{q}_s = 0$.

3. Wegen der starken Dämpfung stabiler Moden ($\gamma_i \ll \gamma_s$) können wir $|q_s| \ll |q_i|$ annehmen. Daher können wir $q_s = 0$ in den g_s setzen.

Mit diesen Annahmen können wir die Gleichungen der stabilen Moden aus (2.16) vereinfachen. Die instabilen Moden q_i ordnen die stabilen q_s:

$$\gamma_s q_s(t) = g_s(q_1, \ldots, q_m; 0, \ldots, 0) \tag{2.17}$$

Damit folgt für die instabilen Moden:

$$\dot{q}_i(t) = -\gamma_i q_i(t) + g_i(q_1, \ldots, q_m; q_{m+1}(q_i), \ldots, q_n(q_i)) \tag{2.18}$$

Im einfachsten Fall ergibt sich dies zu dem aus (2.15) bekannten System: $\dot{q}_1(t) = -\gamma_1 q_1(t) - \frac{ab}{\gamma_2} q_1^3(t)$. In diesem Fall ist g_i eine kubische Funktion.

Wir zeigen jetzt, dass das System selbst die Unterscheidung in stabile und instabile Moden erzeugt. Betrachten wir statt des partionierten Systems (2.16) folgendes System, für das wir keine Aufteilung vornehmen:

$$\dot{q}_j(t) = h_j(q_1, \ldots, q_n) \tag{2.19}$$

[13] Variablen im Kontext der Laserphysik und auch der Synergetik werden als Mode bezeichnet.

[14] Es wird sich nachfolgend zeigen, dass sich die Unterteilung in natürlicher Weise aus dem System heraus ergibt, die Annahme erleichtert aber zunächst die folgende Betrachtung.

Die h_j seien dabei nichtlineare Funktionen. Um das System zu analysieren, betrachten wir die die Variation $q_j(t) = q_j^0(t) + u_j(t)$ der Trajektorie $q_j^0(t)$.

Wir gehen davon aus, dass das System (2.19) stabil und bzgl. der Variation linearisierbar ist.

Wie in der Stabilitätsbetrachtung von (2.7) erhalten wir dann die linearisierte Näherung:

$$\dot{u}_j(t) = \sum_k L_{jk} u_j(t) \tag{2.20}$$

Als Lösung ergibt sich:

$$u_j(t) = u^{(\mu)}(0) e^{\lambda_\mu t} \tag{2.21}$$

Die λ_μ sind dabei die Eigenwerte der Matrix $L = (L_{jk})$, d.h. $\lambda_\mu \vec{u}^{(\mu)}(0) = L\vec{u}^{(\mu)}(0)$. Entwickeln wir die Lösung als Linearkombination der Eigenvektoren, so erhalten wir für geeignete Koeffizienten ξ_μ:

$$\vec{u}(t) = \sum_\mu \xi_\mu(t) \vec{u}^{(\mu)}(0) = \sum_\mu \xi_\mu e^{\lambda_\mu t} \vec{u}^{(\mu)}(0) \tag{2.22}$$

Aus der Stabilitätsbetrachtung von (2.7) wissen wir, dass für die Eigenwerte $\mathrm{Re}(\lambda_\mu) < 0$ gilt, da das System (2.19) nach Annahme stabil sein soll.

Da die h_j nichtlinear sind, fügen wir (2.20) einen nichtlinearen Korrekturterm $N(\vec{u})$ hinzu:

$$\dot{\vec{u}}(t) = L\vec{u}(t) + N(\vec{u}) \tag{2.23}$$

Diese Gleichung lässt sich mit Hilfe der linksseitigen Eigenvektoren $\vec{v}^{(\mu)}$ vereinfachen, d.h. mit den Lösungen von $\lambda \vec{v}^{(\mu)} = \vec{v}^{(\mu)} L$.

Setzen wir in (2.23) die Entwicklung nach Eigenvektoren $\vec{u} = \sum_\nu \xi_\nu(t) \vec{u}^{(\nu)}$ ein und multiplizieren mit den linksseitigen Eigenvektoren $\vec{v}^{(\mu)}$, so erhalten wir für die linke Seite von (2.23):

$$\dot{\vec{u}} \vec{v}^{(\mu)} = \sum_\nu \dot{\xi}_\nu(t) \vec{u}^{(\nu)} \vec{v}^{(\mu)} = \dot{\xi}_\mu(t) \tag{2.24}$$

Dabei haben wir berücksichtigt, dass Eigenvektoren normiert und zueinander orthogonal sind.

Die rechte Seite von (2.23) ergibt sich als:

$$\begin{aligned} (L\vec{u}(t) + N(\vec{u}))\vec{v}^{(\mu)} &= L \textstyle\sum_\nu \xi_\nu(t) \vec{u}^{(\nu)} \vec{v}^{(\mu)} + N(\vec{u}) \vec{v}^{(\mu)} \\ &= \textstyle\sum_\nu \xi_\nu(t) \lambda \vec{u}^{(\nu)} \vec{v}^{(\mu)} + N(\vec{u}) \vec{v}^{(\mu)} \\ &= \lambda_\mu \xi_\mu(t) + N(\textstyle\sum_\nu \xi_\nu(t) \vec{v}^{(\nu)}) \vec{v}^{(\mu)} \end{aligned} \tag{2.25}$$

Somit folgt aus (2.23)

$$\dot{\xi}_\mu(t) = \lambda \xi_\nu(t) + g_\mu(\xi_1, \ldots) \tag{2.26}$$

Dabei sind die nichtlinearen Funktionen g_μ gegeben durch:

$$g_\mu = N\left(\sum_\nu \xi_\nu(t) \vec{v}^{(\nu)} \right) \vec{v}^{(\mu)} \tag{2.27}$$

Die Gleichung (2.26) hat mit $\xi_\mu = q_j$ und $\lambda_\mu = -\gamma_j$ die Form von (2.16). (2.19) zerfällt daher auf natürliche Weise in zwei Gruppen von Systemen: Die Moden ξ_μ mit $\mathrm{Re}(\lambda_\mu) \geq 0$ bilden die Ordnungsparameter, welche die anderen gedämpften, stabilen Moden versklaven.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Kernkonzepte emergenter Systeme vorgestellt. Wir haben dabei zunächst die Systemdynamik betrachtet, hier speziell die Bedeutung nicht-linearer Wechselwirkungen, wie sie in chaotischen Systemen vorherrschen. Daneben haben wir noch das Konzept der Symmetriebrechung am Beispiel des überdämpften Oszillators betrachtet. Nichtlinearität führt im allgemeinen dazu, dass die Trajektorien eines Systems empfindlich auf lokale Störungen reagieren. Aus diesem Grund ist eine Prognose praktisch kaum zu realisieren, da jeder Messfehler exponentiell wächst, und man begnügt sich mit einer Analyse der Attraktoren des Systems.

Eine weitere Eigenschaft komplexer Systeme ist ihre Pfadabhängigkeit, die im Kontext der Automatenmodelle als Zustand bezeichnet wird. Wir haben Turing-Maschinen als allgemeines sequentielles und Petrinetze als nebenläufiges Maschinenmodell eingeführt. Als weiteres Berechnungsmodell haben wir den Lambda-Kalkül und die rekursiven Funktionen dargestellt. Das Besondere an diesen Modellen ist ihre Möglichkeit der Sellbstbezüglichkeit.

Außerdem haben wir verschiedene Modelle studiert, die sich der Strukturbildung und der Selbstorganisation widmen, darunter zellulare Automaten, Lindenmayer-Systeme, neuronale Netzwerke, Peer-to-peer Netzwerke, Evolutionäre Algorithmen und Ameisenkolonien. Diesen Ansätzen ist gemeinsam, dass ihre Komplexität auf der parallelen Interaktion einer großen Anzahl sehr einfacher Systemelemente basiert.

Um den Begriff der Selbstorganisation intensiver zu beleuchten, haben wir uns mit dem Begriff der Komplexität auseinandergesetzt. Komplexität haben wir dabei unter der Perspektive der Kolmogorov-Komplexität, der Shannon-Information – die eng mit der statistischen Physik verwandt ist – und der Berechenbarkeits- und Komplexitätstheorie betrachtet. Weiterhin haben wir den Emergenzbegriff in Zusammenhang mit dem Reduktionismus behandelt. Zum Schluss haben wir selbstordnende Systeme im mathematischen Rahmen der Synergetik studiert, bei der die adiabatische Näherung genutzt wird, um das geordnete Zusammenwirken mehrerer rückgekoppelter Systeme im Rahmen des Versklavungsprinzips zu behandeln.

3 Koordinierung in Agentensystemen

In diesem Kapitel betrachten wir die grundlegenden Konzepte von Multiagentensystemen (MAS). Wir geben zunächst eine Einführung in die bestehenden Ansätze und betrachten dann, wie sich die derzeitige Forschung auf den Gegenstand der Koordination bezieht. Wir betrachten dazu Kooperations- und Verhandlungsprotokolle, normativ handelnde Agenten, Organisationsmodelle von Agentensystemen und die Formen der sozialen Selbstorganisation.

3.1 Grundelemente der Multiagentensysteme

In diesem Kapitel betrachten wir die Sichtweise der *verteilten künstlichen Intelligenz* (VKI) (engl. distributed artificial intelligence, DAI) auf Multiagentensysteme. Nach Weiß (1999) widmet sich die VKI der Analyse, der Konstruktion und der Anwendung von Multiagentensystemen, d.h. von Systemen, in denen mehrere interagierende, intelligente Agenten eine Menge von Zielen verfolgen oder Aufgaben ausführen.[1]

In dieser Definition sind bereits die zentralen Aspekte von Agentensystemen enthalten: Erstens handelt es sich bei den Systemkomponenten um Agenten, d.h. um lose gekoppelte Einheiten, die im Rahmen ihrer Möglichkeiten autonom handeln. Zweitens sind die Systemeinheiten intelligent, worunter man grob verstehen kann, dass Agenten in der Lage sind, auch in verschiedenen Umgebungen flexibel zu agieren, dass sie in der Lage sind, rational zu planen, und dass sie die Fähigkeit besitzen zu lernen. Drittens spielt die Interaktion der Agenten eine zentrale Rolle, da nicht nur die Einheiten verteilt sind, sondern auch Fähigkeiten, Daten und Ressourcen.

Hier zeigt sich die konzeptionelle Abgrenzung der VKI zur KI. Die künstliche Intelligenz (KI) stellt mit dem Bereich des intelligenten Problemlösens eines einzelnen situierten Systems die kognitive Aspekte in den Vordergrund. Für die VKI besteht der Kontext eines Agenten nun wiederum aus Agenten. Damit steht hier der Interaktionszusammenhang zwischen den Agenten im Vordergrund. Intelligenz des Ganzen ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Teile. Dieser Paradigmenwechsel geht einher mit einer Neuausrichtung in Hinblick auf die Nachbardisziplinen. Während die KI der Psychologie und der Neurologie nahesteht, orientiert sich die VKI in Richtung der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften.

Die Fokussierung auf die Interaktionszusammenhänge und ihre Strukturen hat den interessanten Aspekt, dass sie zweiseitig ausgerichtet ist. Zum einen hat

[1] "DAI is the study, construction, and application of multiagent systems, that is, systems in which several interacting, intelligent agents pursue some set of goals or perform some tasks." (Weiß, 1999, S.1)

sie eine Ausrichtung auf die Mikro-Ebene, d.h. den Agenten, der in die Interaktionszusammenhänge eingebettet ist und dessen Handeln somit kontexttualisiert wird. Genauso werden aber mit ihr auch die Makro-Zusammenhänge auf Ebene des Gesamtsystems betrachtet, bei denen nicht mehr die Handlungen des einzelnen relevant sind, sondern vielmehr der Prozess mit seinen Mustern insgesamt. Diese Mikro-Makro-Dualität wird uns in den weiteren Ausführungen begleiten.

Die Möglichkeit – und meist auch der Zwang – zur Interaktivität der Agenten bildet das Leitmotiv für die VKI-Forschung: „Wer kommuniziert wann mit wem worüber?“ Wie im folgenden noch weiter ausgeführt wird, kann man die Koordination der Agenten grob in zwei Klassen aufteilen: in Kooperation und in Konkurrenz. Ersteres liegt vor, wenn die Agenten gemeinsam auf ein Ziel hin arbeiten und sich nur abstimmen müssen, letzteres liegt vor, wenn die Ziele in Konflikt miteinander stehen.

Die Koordination wird durch Protokolle, d.h. durch verteilte Algorithmen geregelt. Typischerweise ist aus der Protokollsicht jeder Agent des Systems ein potentieller Interaktionspartner. Offensichtlich steigt die Komplexität, geeignete Interaktionspartner zu finden, die Ziele mit ihnen abzustimmen und die Pläne konfliktfrei zu gestalten, mit der Anzahl der in einem System vorhandenen Agenten an. Ziel muss es aber sein, den Aufwand linear, d.h. in $O(n)$ zu gestalten, da man dann die Reaktionszeiten des Systems auch bei steigenden Agentenzahlen konstant halten kann, indem man die Zahl der Rechner im MAS-Netzwerk entsprechend aufstockt. Der Aufwand wächst im allgemeinen jedoch schneller als die Zahl der Agenten selbst, da typische verteilte Algorithmen Kommunikationskomplexitäten von $O(n \log n)$ oder $O(n^2)$ aufweisen. Dieser Zuwachs an Koordinierungsaufwand ist als *Skalierungsproblematik* der VKI bekannt. Ihr kann nur begegnet werden, indem man Strukturen schafft, die den Koordinationsprozess regeln, beispielsweise, indem man nur eine Teilmenge aller Agenten betrachtet oder nur bestimmte Teams für Aufgaben heranzieht.

Die Skalierungsproblematik wirft somit Fragen auf, die über die Ebene einzelner Agenten hinausgeht und sich nur auf der Systemebene behandeln lässt. Es ist daher wichtig, sich mit der Formation von Teams und der Organisationsstruktur von Multiagentensystemen zu beschäftigen.

Einige Autoren gehen sogar noch weiter, indem sie postulieren, dass die Skalierungsproblematik nur dann zu lösen ist, wenn die Organisationsstruktur explizit repräsentierter Bestandteil des Systems ist und das Systems aktiv auf diese Einfluss nehmen kann.

> Thus, the current state of the art is challenged by MASs that are larger or where the magnitude or speed of agent population variability confounds one overall design. To tackle both these problems we hypothesize that MASs should be *self-building* (able to determine the most appropriate organizational structure for the system by themselves at run-time) and *adaptive* (able to change this structure as their environment changes). (Turner und Jennings, 2001, 1)

Diese Eigenschaft der Selbstkonstruktion lässt sich auch als *Reflexivität* des Multiagentensystems beschreiben, bei dem die Organisationsstruktur das veränderte Objekt ist. Dies ist ein echtes Novum, denn in den meisten Forschungs-

beiträgen erscheinen Organisationsstrukturen als ein kontextuelles Konstrukt, innerhalb dessen sich die Agenten koordinierten. Der Agent war also die betrachtete Variable, die sich in Abhängigkeit von der Organisation entwickelte: Der Agent war in Teams involviert, welche von der Organisationsstruktur geformt werden; er richtet sein Handeln an den Notwendigkeiten aus, die sich aus der Organisations- und Teamstruktur ergeben usw. Bei all diesen Formen variiert also der Agent, und die Organisation bleibt statisch. Reflexivität kehrt jetzt diese Perspektive um, indem sie die Organisation zur Variablen erklärt, die durch das Handeln der Akteure geformt wird. Man geht sogar so weit, in diesem Zusammenhang von der *lernenden Organisation* zu sprechen.

Diese zutiefst sozialwissenschaftlich orientierte Sichtweise, dass Agenten soziale Akteure sind, werden wir in Kapitel 5 und 6 erneut aufgreifen. Sie bestimmt die folgende Darstellung insofern, als dass sie sich an dem Aspekt der *Sozialität* des Agenten in den verschiedenen Ausprägungen orientiert. Sozialität findet ihren Ausdruck auf den verschiedensten Betrachtungsebenen eines Agentensystems. Wir betrachten im folgenden den Agenten in seiner Rolle als sozialen *Akteur*, die Dynamik, die *Agentengruppen* entfalten, die Rolle von *Organisationsformen*, die eine vorstrukturierende Funktion für Agentengruppen besitzen und schließlich die Ebene der *Agentensozialität*, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Organisationsformen nicht statisch fixiert sind, sondern sich aus dem Zusammenspiel der Akteure ergeben.

3.1.1 Agenten als soziale Akteure

Agenten sind in einer Umgebung situierte Einheiten, die ihre Aufgaben autonom verfolgen. Ein Agent ist autonom, d.h. im Rahmen der operationalen Randbedingungen (interne wie externe) ist er in seiner Handlungswahl frei, Restriktionen sind nur von ihm selbst auferlegte. Ein Agent ist in dem Sinne intelligent, als dass er zielverfolgend ist und dass hiermit eine gewisse Flexibilität bezüglich der Zielrealisierung verbunden ist, so dass ein Agent auch auf sich verändernde Randbedingungen reagieren kann. Insofern unterscheidet sich ein Agent der VKI noch nicht von einem Agenten der KI. Hier trifft man nicht die Annahme, dass die Umgebung aus anderen Agenten besteht. Aus der Tatsache, dass ein Agent in der Lage ist, auf die Umwelt einzuwirken, folgt dann, dass er in der Lage ist, mit anderen Agenten zu interagieren.

Diese Eigenschaften grenzen Agenten von Objekten ab, die weder autonom noch lernend oder zielverfolgend sind. Die engste Verbidung finden Agenten noch zu den aktiven Objekten (Nierstrasz, 1993), bei denen jedem Objekt ein eigener Kontrollfluss (engl. thread) zugeordnet wird. Aktive Objekte kann man eine gewisse Zielverfolgung zusprechen. Objekte sind aber nicht autonom, denn sie diskriminieren im allgemeinen nicht danach, von welchem Objekt ihre Methoden aufgerufen werden. Ein Agent kann dies tun, beispielsweise um Konflikte zu vermeiden. Ebenso unterscheiden sich Agenten von Expertensystemen, da letztere nicht sozial eingebettet sind.

Es gibt unterschiedliche Forschungsansätze, den Aufbau eines Agenten zu konzeptionieren. Da Zielverfolgung und Planung ein zentraler Gegenstand der KI ist, entstammen viele Strukturierungsansätze aus dem Bereich der formalen

Logik. Hier werden Modallogiken zur Wissensrepräsentation (siehe Levesque und Lakemeyer, 2000) oder zur Spezifikation der temporalen Aktivitäten (siehe Wooldridge und Jennings, 1995; Wooldridge, 2000) verwendet. Als praktische Systeme, die auf diesem Ansatz aufbauen, sind hier METAMEM (Barringer u. a., 1990) und Congolog (Giacomo u. a., 2000) zu nennen.

Ein weit verbreiteter Ansatz ist das Design von Agenten nach dem BDI-Paradigma (Bratman, 1987; Rao und Georgeff, 1991), bei dem das Wissen (engl. beliefs), die Wünsche (engl. desires) sowie die Absichten (engl. Intentions) eines Agenten spezifiziert werden und die dann zur Wahl der Aktivitäten herangezogen werden. Die verbreiteste Datenstruktur zur Darstellung von Zielen und Plänen basiert auf der formalen Logik, hier speziell der Modallogik. Modalitäten sind Operatoren der Logik, die sich auf den Wahrheitswert von Formeln beziehen. Dies ist in der Prädikatenlogik nicht möglich, da man in ihr keine Prädikate über Formeln ausdrücken kann. Der folgende Ausruck ist demnach ungeeignet, um auszudrücken, dass Alice glaubt, dass Tweety ein Vogel sei:

$$\text{believes}(\textit{alice}, \text{is-a-bird}(\textit{tweety}))$$

Das Problem besteht darin, dass die Argumente des Prädikats *believes* Terme sein müssen, is-a-bird(*tweety*) jedoch eine Formel ist.

Die klassischen Modalitäten sind die der Notwendigkeit und die der Möglichkeit (Hughes und Cresswell, 1984). Eine Formel ϕ ist notwendigerweise wahr, wenn man sich keine Welt vorstellen kann, in der ϕ nicht wahr wäre. Diese Tatsache wird durch die Formel $\Box\phi$ notiert. Die Aussage ϕ ist nur möglicherweise wahr, wenn Welten vorstellbar sind, in denen ϕ wahr ist, aber auch welche, in denen das nicht gilt. Dies wird als $\Diamond\phi$ notiert. Erweitert man die Aussagenlogik um diese beiden Modalitäten, so erhält man die propositionale Modallogik. Um die Semantik der Modalitäten exakt festzuhalten, fordert man axiomatisch die Gültigkeit gewisser Formeln (vgl. dazu die Übersicht in Abb. 3.1). Die Axiome K und N werden stets gefordert, die übrigen nicht notwendigerweise. Verwendet man Kripke-Strukturen als Modell der Modallogik, so korrespondieren die Axiome mit Eigenschaften der zu betrachtenden Sichtbarkeitsrelation der Kripke-Struktur. Sie ist in der dritten Spalte notiert.

Name	Axiom	Bedingung
K	$\Box(\phi \Longrightarrow \psi) \Longrightarrow (\Box\phi \Longrightarrow \Box\psi)$	
N	$\phi \Longrightarrow \Box\phi$	
T	$\Box\phi \Longrightarrow \phi$	reflexiv
D	$\Box\phi \Longrightarrow \Diamond\phi$	seriell
4	$\Box\phi \Longrightarrow \Box\Box\phi$	transitiv
5	$\Diamond\phi \Longrightarrow \Box\Diamond\phi$	Euklid

Abbildung 3.1: Axiome der Modallogik

Notwendigkeit ist nicht die einzige mögliche Interpretation der Modalität $\Box$. Interpretiert man die Modalität $\Box\phi$ als „ϕ wird gewusst“, so kann man hiermit eine Logik des Glaubens/Wissens formalisieren. Dies hat zur Konsequenz, dass

aus dem Notwendigkeitsaxioms $\phi \Longrightarrow \Box\phi$ folgt, dass *alle* Tautologien gewusst werden. Außerdem ist Wissen unter Implikation abgeschlossen, d.h. alle gültige Folgerungen $\phi_1 \wedge \ldots \wedge \phi_n \Longrightarrow \phi$ werden gewusst. Gilt das D-Axiom ($\Box\phi \Longrightarrow \Diamond\phi$ und $\Diamond\phi \equiv \neg\Box\neg\phi$), so ist Wissen widerspruchsfrei. Gilt das T-Axiom ($\Box\phi \Longrightarrow \phi$), so können nur Wahrheiten gewusst werden. Gilt das 4-Axiom ($\Box\phi \Longrightarrow \Box\Box\phi$), so besteht Wissen über das Gewusste. Gilt das 5-Axiom ($\neg\Box\neg\phi \Longrightarrow \Box(\neg\Box\neg\phi)$), so besteht Wissen über das Ungewusste.

In der *BDI-Logik* werden die Überzeugungen (*beliefs*), die Bedürfnisse (engl. *desires*) und die Absichten eines Agenten (engl. *intentions*) eines Agenten durch Modalitäten modelliert. Wir folgen der Darstellung von Panzarasa, Jennings und Norman (2002). Überzeugungen betreffen die Welt, die mentalen Haltungen anderer Agenten oder auch den Agenten selbst. Die Tatsache, dass der Agent a zum Zeitpunkt t der Überzeugung ist, dass ϕ gilt, wird als $\mathbf{Bel}(a, \phi)(t)$ dargestellt. Es gelten die Axiome KD45:

$$\begin{aligned}
\mathbf{Bel}(a,\phi)(t) \wedge \mathbf{Bel}(a,(\phi \Longrightarrow \psi))(t) &\Longrightarrow \mathbf{Bel}(a,\psi)(t) \\
\mathbf{Bel}(a,\phi)(t) &\Longrightarrow \neg\mathbf{Bel}(a,\neg\phi)(t) \\
\mathbf{Bel}(a,\phi)(t) &\Longrightarrow \mathbf{Bel}(a,\mathbf{Bel}(a,\phi))(t) \\
\neg\mathbf{Bel}(a,\phi)(t) &\Longrightarrow \mathbf{Bel}(a,\neg\mathbf{Bel}(a,\phi))(t)
\end{aligned}$$

Die Bedürfnisse und Ziele eines Agenten drücken die Zustände der Welt aus, die er gern erreichen möchte. Die Tatsache, dass der Agent a zum Zeitpunkt t das Bedürfnis hat, ϕ zu erreichen, wird als $\mathbf{Des}(a, \phi)(t)$ dargestellt, Ziele als $\mathbf{Goal}(a, \phi)(t)$. Der Unterschied zwischen Zielen und Bedürfnisse liegen darin, dass Bedürfnisse inkonsistent und sogar unerfüllbar sein können, während Ziele als Menge *konsistenter und realisierbarer* Zustände definiert sind, von denen man annehmen kann, dass der Agent sie erreichen kann. Agenten haben keine den Überzeugungen widersprechenden Ziele.

Die Absichten eines Agenten sind immer auf einen bestimmten erstrebenswerten Zustand der Welt ausgerichtet. Besitzt ein Agent die individuelle Absicht, einen Zustand zu erreichen, so ist er sich selbst gegenüber verpflichtet (*self-commitment*), entsprechend zu handeln. Die Absicht des Agenten a, zum Zeitpunkt t einen Zustand, in dem ϕ gilt, anzustreben, wird $\mathbf{Int}(a, \phi)(t)$ notiert. Ein Agent besitzt keine Absichten, die seinen Überzeugungen widersprechen:

$$\mathbf{Int}(a,\phi)(t) \Longrightarrow \neg\mathbf{Bel}(a,\neg\phi)(t)$$

Eine deutliche Abkehr von planenden Ansätzen stellt das reaktive Paradigma dar, bei dem Agenten kein Weltmodell aufbauen, keine – oder nur geringe – Zustandsinformation speichern und ihre Wahl anhand einer Liste einfacher Wenn-Dann Regeln treffen. Die Vorteile des Ansatzes sind seine geringe Darstellungsgröße und seine kurzen Reaktionszeiten. Anwendung findet dieser Ansatz daher insbesondere im Bereich der Robotik (Brooks, 1990). Besondere Prominenz hat dieser Ansatz unter dem Schlagwort der Schwarmintelligenz bekommen (Kennedy und Eberhart, 2001). Ausgangspunkt ist hier die Feststellung, dass Tierpopulationen (wie Ameisenkolonien, Fisch- oder Vogelschwärme) in der Lage sind, global kohärentes (um nicht zu sagen: intelligentes) Verhalten aufweisen, und dies obwohl das einzelne Individuum dazu kognitiv nicht in der Lage ist.

So kann eine einzelne Ameise keine Wegewahloptimierung bei der Futtersuche betreiben, die Kolonie als ganzes schon.

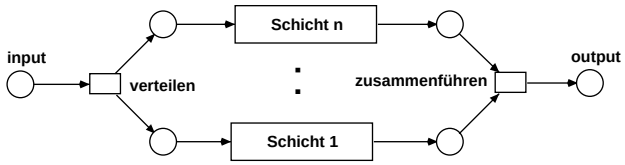


Abbildung 3.2: Horizontale Agentenarchitektur

Weitere typische Ansätze stellen die Schichtenarchitekturen dar. Hierbei unterscheidet man zwischen sogenannten horizontalen und vertikalen Schichtungen. Bei der horizontalen Schichtung erhalten alle Planungsschichten die gleiche Eingabe. Ihre Ergebnisse werden dann zu einer Gesamtentscheidung zusammengesetzt. Ein Beispiel für eine horizontale Schichtung ist das Touring-Machines-System (Ferguson, 1992).

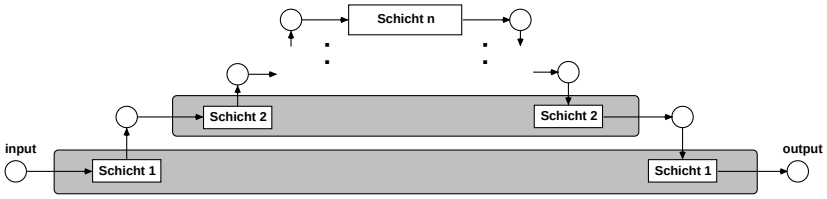


Abbildung 3.3: Vertikale Agentenarchitektur (two-pass)

Vertikale Architekturen bearbeiten die Eingabe und geben ihre Ergebnisse an die nächste Ebene weiter. Man unterscheidet Systeme, bei denen die Bearbeitung in der letzten Schicht zu Ende ist (one-pass), von solchen, bei denen die letzte Schicht ihre Ergebnisse wieder zurück reicht, so dass sie die gesamte Schichtung in rückwärtiger Richtung durchläuft (two-pass). Ein Beispiel für eine vertikale Schichtung ist das INTERARP-System (Müller und Pischel, 1994).

Daneben existieren als Erweiterung der objektorientierten Programmiersprachen auch agentenorientierte Sprachen wie Agent-0 (Shoham, 1990), Agentspeak (Rao, 1996), JASON (Bordini u. a., 2007) oder JADE (Bellifemine u. a., 2001).

3.1.2 Interaktionsgruppen

Agenten existieren nicht isoliert, sondern stets im Kontext anderer Agenten. Agenten interagieren, daher ist die Perspektive des Interaktionszusammenhangs der Agenten, kurz: seine *Interaktionsgruppe*, eine natürliche Betrachtungsebene des sozialen Agenten. Durch den Aspekt der *Sozialität* von Agenten geht das Agentenkonzept der VKI über das der KI hinaus. So spricht sich Gasser (1991) dafür aus, die Konzepte des Wissens und der Handlung speziell vor dem Hintergrund ihrer sozialen Bezüge zu interpretieren. Dies legt nahe, das Charakteristische von Agenten (wie *Autonomie*, *Flexibilität*, *Intelligenz* usw.) nicht primär

als eine interne Eigenschaften zu deuten, sondern es vielmehr als ein relationales Konstrukt zu betrachten, das sich z.B. in den Interaktionsbeziehungen als Abhängigkeitsverhältnis äußert. Abhängigkeitsverhältnisse ergeben sich hierbei beispielsweise aus der funktionalen Spezialisierung der Agenten oder dem Besitz relevanter Ressourcen.

Interaktionsgruppen ergeben sich durch die sozialen Verflechtungen ihrer Agenten. Diese können funktionaler Natur sein, d.h. ein Agent ist auf die Fähigkeiten eines anderen angewiesen, um seine eigenen Aufgaben zu erfüllen, oder koordinativer Natur, beispielsweise, wenn es um die Vermeidung von Zugriffskonflikten geht.

Die Interaktion von Agenten wird in Multiagentensystemen meist in Form von Nachrichtenkommunikation modelliert. Um eine Kommunikation von Sender und Empfänger zu ermöglichen, ist es notwendig, dass sich beide Parteien über die Bedeutung der Nachricht einigen. Dazu ist erstens eine gemeinsame Darstellungssprache notwendig, zweitens eine Taxonomie (auch: Ontologie), die das Diskursuniversum beschreibt, sowie drittens eine Beschreibung der Intention, die mit der Nachricht verbunden ist. Eine Spezifikationssprache für diese drei Elemente wird als *Agentenkommunikationssprache* bezeichnet.

Ontologien oder Konzeptbeschreibungssprachen finden sich im Kontext des *semantic web* (Studer u. a., 2003). Beispiele für Ontologiesprachen sind DAML (Ogbuji und Ouellet, 2002) oder OWL (Smith u. a., 2004). Als formales Konzept der Kommunikation greift die VKI auf die Theorie der Sprechakte (engl. speech act theory) nach Searle (1970) zurück, nach der Kommunikationen Handlungen sind, die den Empfänger zu einer bestimmten Reaktion veranlassen sollen. Sprechakte sind informierend, anfragend, fordernd usw. Beispiele für Agentenkommunikationssprache sind die Spezifikationssprachen KQML (*knowledge query and manipulation language*) (Knowledge Sharing Initiative External Interfaces Working Group, 1993) und FIPA-ACL (*FIPA agent communication language*) (FIPA, 1998).

Neben der Spezifikation der Kommunikation ist noch der darauf aufbauende Koordinationsprozess zu charakterisieren. Man kann dabei grob zwei Klassen unterscheiden: In die erste Klasse fallen solche Ansätze, die sich eines Mediums bedienen, um die Agenten zu koordinieren. Als klassischen Ansatz sind hier die *blackboard*-Systeme zu nennen, bei denen Agenten Nachrichten wie an einem Schwarzen Brett hinterlassen. Ein Agent, der eine Teilaufgabe delegieren möchte, schreibt die Aufgabenbeschreibung an das Schwarze Brett. Alle anderen Agenten können dann diese Nachricht sehen und bei Interesse die erarbeitete Lösung wieder an das Brett hängen. Eine direkte Kommunikation ist daher nicht notwendig. Ein Beispiel für eine solche Architektur sind die *tuple spaces* in LINDA (Carriero und Gelernter, 1989). In die zweite Klasse fallen solche Ansätze, bei denen Ablaufprotokolle die direkte Kommunikation der Agenten regeln. Hier wird spezifiziert, wer wem Nachrichten schicken darf oder welche Informationen die jeweiligen Nachrichten enthalten müssen. Klassische Beispiele sind hier das *Contract-Net* Protokoll (Smith, 1977) und das *Partial Global Planning* Protokoll (Durfee und Lesser, 1991).

3.1.3 Organisationsformen

In der allgemeinen Formulierung ergeben sich die Kommunikationsbeziehung anhand der möglichen Delegationsbeziehungen und anhand der funktionalen oder temporalen Abhängigkeiten. Alle Agenten des Systems sind dabei zu berücksichtigen, denn im schlimmsten Fall hängen alle Agenten voneinander ab.

In natürlichen Sozialsystemen treffen die Akteure jedoch nicht beliebig aufeinander, und sie müssen auch nicht alle ihre Pläne mit allen anderen bis ins kleinste abstimmen. Dies liegt daran, dass soziale Systeme bereits vorstrukturiert sind. Es existieren Strukturen, die regeln, welche Interaktionsgruppen sich bilden können. Daneben existieren Normen, beispielsweise in Form von *Rollen*, die unabhängig von ihrem Träger Rechte und Verpflichtungen beschreiben. Damit reduziert sich der Abstimmungsaufwand der Einzelpläne enorm.

Die Einschränkungen, die soziale Strukturen für die Agenten darstellen, stehen nicht im Widerspruch zur Autonomie, denn obwohl die Agenten den Erwartungen einer Rolle genügen müssen, so sind sie doch prinzipiell in ihrer Wahl, ob sie eine Rolle einnehmen, frei. Natürlich sind die Agenten nur so frei, wie es die Abhängigkeiten zulassen.

Beispiele für Sozialstrukturen sind Organisationstrukturen, die durch Hierarchien und Kompetenzen die Menge der potentiellen Teammitglieder eingrenzen und gleichzeitig deren Verhalten bereits grob festlegen. Die Abläufe, die die Zusammenarbeit von Rolleninhabern regeln, sind meist durch Geschäftsprozesse (engl. „business processes“) standardisiert.[2]

Diese sozialen Strukturen, die unabhängig von den Akteuren existieren, bilden die Grundlage für die Koordinationsfähigkeit eines Multiagentensystems. Man kann dabei grob in subjektive und objektive Formen der Koordination unterscheiden (Schumacher, 2001). Die subjektive Form stellt dabei die Perspektive der Agenten auf den Koordinationsprozess dar, die objektive Form die Perspektive die des gesamten Systems.

Als zentraler Schlüssel zur Koordinierung wird aus Agentensicht das Konzept der *Zusicherung* (engl. commitment) gesehen. Durch Zusicherungen legen Agenten ihr zukünftiges Verhalten gegenüber anderen fest, üblicherweise unter der Bedingung, dass gewisse Rahmenbedingungen in der Zwischenzeit unverändert bleiben. Darauf aufbauend gelangt man von individuellen Annahmen, Wünschen und Absichten zu den innerhalb einer Gruppen geteilten Annahmen, Wünschen und Absichten. Die Gruppenmitglieder legen einander insbesondere durch die gemeinsamen Absichten fest, indem sie ihre Absprachen in einem überindividuellen Element, den geteilten Absichten (engl. joint intentions), bündeln (vgl. Jennings, 1993, 1996; Castelfranchi, 1995; Ossowski, 1999).

Die Systemsicht betrachtet dagegen die Interaktionsstruktur an sich, losgelöst von der Agentenperspektive. Die konkreten Realisierungformen der Organisationsstrukturen werden im Rahmen der *Organisationstheorie* untersucht, ein Forschungsbereich, der sowohl im Fokus der Betriebs- als auch der Sozialwissenschaften steht und in jüngster Zeit auch durch den Bereich der Wirtschaftsinformatik thematisiert wird. Eine Wissenschaftsdisziplin im Schnittpunkt der drei

[2] In der Literatur werden solche Systeme auch unter dem Begriff der elektronischen Institution oder unter dem des elektronischen Marktes behandelt.

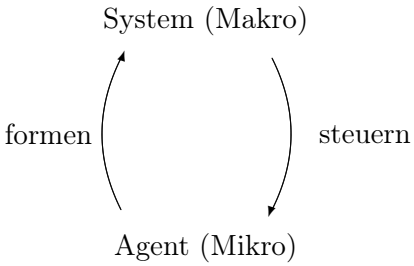


Abbildung 3.4: Mikro/Makro Wechselwirkung

Forschungsbereiche ist die *Computational Organsisation Theory* (siehe Prietula u. a., 1998; Carley und Gasser, 1999).

3.1.4 Sozialität als Mikro/Makro Wechselwirkung

Es ist zu beachten, dass Organisationen keine festgefügten Strukturen sind, innerhalb deren sich die Tätigkeiten der Agenten abspielen und von der alle Agenten restriktiv gelenkt werden.[3] Organisationen treten den Akteuren zwar einerseits als überindividuelle, quasi-objektivierte Strukturen mit eigener Realität entgegen, sie sind umgekehrt aber auch sozial konstituiert, indem die Akteure die Strukturen durch ihre Interaktionen erst (re-)produzieren. Es wird auch davon gesprochen, dass die Systemstrukturen ein emergentes Produkt der Handlungen des Systems selbst sind. Dies hat man sich so vorzustellen, dass Agenten durch ihre Handlungen innerhalb der Organisation ständig die Ausrichtung oder die Gewichtung der Organisationsziele verschieben, meist ohne dies intendiert zu haben. Auch Rollenerwartungen oder Prozeduren können sich so verschieben.

Man kann also nicht davon ausgehen, dass Organisationsstrukturen ein fester Kontext wären, der unter anderem für effektive Kommunikation sorgt (wie in Shoham und Tennenholtz, 1994). Man kann aber auch nicht umgekehrt davon ausgehen, dass soziale Strukturen emergent aus dem Nichts entstehen (wie in Walker und Wooldridge, 1995). Es ist vielmehr so, dass beide Variablen – Organisationsstruktur und Akteurshandeln – wechselseitig miteinander in Verbindung stehen. Darüber sollte zudem nicht vergessen werden, dass Organisationen ihrerseits einen gesellschaftlichen Kontext besitzen, also ihrerseits eingebettet sind.

Diese Wechselseitigkeit ist als die Mikro-Makro-Dualität bekannt. Die adäquate Modellierung der Wechselwirkung beider Elemente gilt als Schlüssel zur Konstruktion skalierungsfähiger Multiagentensystem (vgl. Schillo u. a., 2000).

Die *wechselseitige* Beeinflussung interaktionistischer und strukturalistischer Elemente als Prozess dynamisiert das System enorm. Dies stellt eine Herausforderung für das Design von Agentensystemen dar, denn das Wechselspiel von Struktur und Handlung setzt eine dynamische Anpassbarkeit von Systemstrukturen und -verhalten voraus. Diese Strukturdynamik wird in der Informatik

[3] Soziologisch formuliert: Organisationen sind nicht nur strukturalistisch geprägte Phänomene.

meist vermieden, da derartig selbstmodifizierende Systeme erfahrungsgemäß schwerer zu beherrschen sind als gesteuerte oder starre Systeme. Die Anforderungen heutiger Anwendungskontexte erfordern jedoch in zunehmendem Maße die Selbstmodifikation, da auch die Anwendungskontexte starken Veränderungen unterworfen sind. Damit stellt sich erstens die Frage nach den zugrundeliegenden Mechanismen der Strukturdynamik und zweitens, wie eine zielgerichtete Steuerung solch flexibler Systeme erreicht werden kann.

3.1.5 Multiagentensysteme versus Workflows

Die Metaphern des Multiagentensystems sind eng mit denen der betrieblichen Informationssysteme (engl. workflow management system, WFMS, oder auch process aware information systems, PAIS) verwandt. Die Agentenmetapher beschreibt Systeme als System von Agenten, die aufgrund ihrer Einschränkungen (Wissen, Ressourcen, Fähigkeiten) mit anderen Agenten interagieren müssen, wobei die Agenten einerseits um Ressourcen in Konkurrenz zueinander stehen und andererseits in Team kooperieren müssen, um ihre Ziele verfolgen zu können. Die Agentenmetapher stellt damit einen bottom-up Ansatz dar. Betriebliche Informationssysteme dagegen nehmen eine top-down Perspektive ein: Workflow-Management-Systeme bestehen im wesentlichen aus Datenbanken und -schemata zusammen mit einem Rollenmodell zur Zugriffkontrolle und zur Definition von Verantwortlichkeiten. Darauf aufbauend werden die Geschäftsprozesse definiert, die vom System zur Laufzeit überwacht werden.

Vergleicht man Multiagentensysteme mit Workflow-Management-Systemen, so stellt man fest, dass mit beiden Ansätzen jeweils Vor- und Nachteile verbunden sind. Die Agentenmetapher stellt ein gutes Konzept dar, um die Entwurfsprinzipien der Abstraktion und der Dekomposition zu unterstützen. Stellt man sich Agenten als Spezialisten vor, so werden für einen Bereich jeweils Wissen und Fähigkeiten an einem Ort gebündelt, so dass sich Vorteile für die Wartbarkeit des Systems ergeben. Außerdem erhöht es die Flexibilität des Systems, denn um neue Fähigkeiten bereitzustellen, ist es ausreichend, einen weiteren Agenten zu implementieren, der die Funktionalität dann anderen Agenten zur Verfügung stellt. Sind die Fähigkeiten formal spezifiziert, kann das Systems die neue Funktionalität sogar automatisch integrieren. Die Agentenmetapher ist jedoch ungeeignet, um die Systemstrukturierung anzuleiten. Hier sind überindividuelle Konstrukte – wie Teams, Allianzen usw. – notwendig. Geht man von sich autonom koordinierenden Agenten aus, so erzeugt das Koordinationsverhalten der Agenten emergentes Gesamtverhalten. Prominentestes Beispiel ist der Bereich der Schwarmintelligenz. Im allgemeinen ist dies aus Entwicklersicht jedoch unzulänglich, denn wenn zur Designzeit unbekannt ist, welche Koordinationsmuster entstehen, dann ist auch nicht klar, ob diese erwünschtes (genauer: korrektes) Verhalten darstellen.

Bei den Workflow-Mangement-Systeme stellt sich die Situation annähernd komplementär dar. Das System hat die volle Kontrolle über die Daten und die Geschäftsprozesse, wodurch es überhaupt erst möglich wird, gewünschte Systemeigenschaften zuzusichern, darunter so essentielle Sicherheitsaspekte wie Integrität, Vertraulichkeit, Verlässlichkeit. Die Zusicherbarkeit wird jedoch meist

dadurch erkauft, dass diese Systeme keine oder nur geringe Mechanismen zur flexiblen Anpassung bieten. Anpassungen sind Wartungstätigkeiten während der Entwicklung. Auch sind diese Systeme meist geschlossene Systeme, die keine Unterstützung organisationsübergreifender Abläufe bieten. Um die Interoperabilität zu erreichen, müssten die Daten und Prozesse zunächst aber erst einaml formal spezifiziert werden.

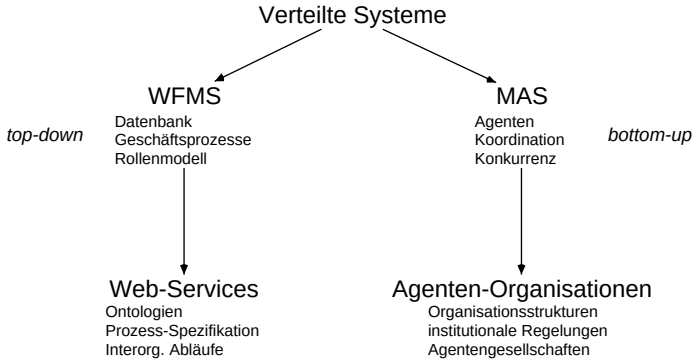


Abbildung 3.5: Konvergenz von MAS und WFMS

Die pointiert dargestellten Unzulänglichkeiten der beiden Ansätze sind den Forschungsgemeinschaften wohl bewusst. So existieren Erweiterungen der WFMS um Spezifizierung der Daten und Prozesse durch Beschreibungslogiken. Diese Bemühungen werden im Bereich der *Web-Dienste* (engl. web services) und des *semantic web* gebündelt. Web-Dienste (Alonso u. a., 2003) stellen einen Standard zur Entwicklung und Integration verteilter Systeme dar. Hier existieren Technologien wie die Ontologiesprachen OWL (Web Ontology Language), service oriented architecture (SOA), web service definition language (WSDL) (Gottschalk, 2000; OASIS, 1993–2007). Analog existieren Bemühungen, Koordinationsstrukturen wie Teams oder Organisationen mit leitender Wirkung im Bereich der Agentenorientierung konzeptionell zu integrieren. Diese sich abzeichnende Konvergenz von Multiagentensystemen und Workflow-Mangement-Systemen ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

3.2 Koordination: Kooperation und Konkurrenz

Es ist im allgemeinen davon auszugehen, dass zwischen den Agenten Abhängigkeiten existieren. Funktionale Abhängigkeiten existieren, wenn ein einzelner Agent nicht alle zur Erfüllung seiner Ziele benötigten Fähigkeiten besitzt, so dass er auf die Hilfe anderer Agenten angewiesen ist. Instrumentelle Abhängigkeiten ergeben sich, sobald sich mehrere Agenten ein Hilfsmittel (z.B. ein Werkzeug) teilen, so dass es zu Synchronisationsbedingungen, beispielsweise in Form wechselseitiger Ausschlüsse, kommt. Abhängigkeiten ergeben sich auch, wenn Agenten um den Zugang zu knappen Ressourcen und deren Verwendung konkurrieren. Koordinationssituation lassen sich also anhand der drei Fragen kategorisieren:

1. Besitzt der Agent notwendige Fähigkeiten und Werkzeuge?
2. Existieren genug Ressourcen für die Zielrealisierung?
3. Sind die Ziele der Agenten kompatibel?

Die Koordination in einer Interaktionsgruppen sind idealtypischerweise entweder *kooperierend* oder *konkurrierend*.

Existiert – zumindest für den gewählten Ausschnitt der Betrachtung – ein gemeinsames Ziel, so liegt die Situation der *Kooperation* vor. Üblicherweise sind kooperierende Interaktionsgruppen durch die Gleichartigkeit ihrer Aktivitäten gekennzeichnet, die sich aus dem gemeinsamen Ziel ergibt, auf das die Planungen der Agenten ausgerichtet sind.

Eine *konkurrierende* Interaktionsgruppe ist dadurch gekennzeichnet, dass die individuellen Ziele eines Agenten nicht gleichzeitig mit denen anderer Agenten realisiert werden können. Dies mag daran liegen, dass zwei Agenten gleichzeitig exklusiven Zugriff auf ein Betriebsmittel verlangen, oder auch daran, dass ein Verkäufer einen möglichst hohen, der Einkäufer einen möglichst niedrigen Preis anstrebt. Solche Konflikte müssen im Interesse eines reibungslosen Ablaufes aufgelöst werden. Die Lösungsansätze reichen von Algorithmen zur Deadlock-Vermeidung bis hin zu spieltheoretischen Ansätzen.

3.2.1 Kooperation: Verteiltes Problemlösen

Liegt eine gemeinsame Zielsetzung der Agenten vor, so bilden die Agenten ein *Team*, dessen Aufgaben darin besteht, die Fähigkeiten seiner Mitglieder auf das gemeinsame Ziel, die Teamaufgabe, zu koordinieren: „Wer macht wann was?“ Dieses algorithmische Problem wird als *Verteiltes Problemlösen* (engl. distributed problem solving, DPS) bezeichnet. Dieses umfasst zwei Aspekte: Zum einen die Planung und zum anderen die Ausführung. Beide Aspekte können sowohl zentralisiert als auch verteilt erfolgen. Zentralisierte Planung und Ausführung entspricht dem aus der KI bekannten Problemlösen. Der Agent interagiert hier nicht mit anderen Agenten. Der Fall der zentralisierten Planung und der verteilten Ausführung kommt dann zum Einsatz, wenn die ausführenden Agenten verteilt vorliegen und mit Spezialfähigkeiten ausgestattet sind, die Planung aber nicht selbst vornehmen. Der Nachteil des Verfahrens ist, dass zur Planung ein globales Weltmodell aufgebaut werden muss. Dieser Aufwand lohnt sich aber dennoch, nämlich dann, wenn zentralisierte Algorithmen erprobter oder effizienter sind als ihre verteilten Pendants. Typische Beispiele finden sich als Optimierungsprobleme in Unternehmen, bei denen Planung und Ausführung in verschiedene Kompetenzbereiche fallen. Der umgekehrte Fall des verteilten Planens und der zentralisierten Ausführung liegt dann vor, wenn schon in die Planung die Spezialfähigkeiten der Agenten einfließen. Ein Beispiel ist hier die Konstruktion einer neuen Maschine, bei dem das Spezialwissen verschiedener Entwickler im Entwurf zusammenfließt. Existiert der fertige Entwurf, kann er in einem zentralisierten Produktionsprozess ausgeführt werden.

Der Fall der verteilten Planung und Ausführung kombiniert beide Aspekte. Hier ist also ein Plan zu erstellen, der die Aufgaben den Agenten zuweist und

ihre Bearbeitung synchronisiert. Bei der verteilten Planung ist zu regeln, wie die Teilaufgaben unter den Agenten entsprechend ihrer Fähigkeiten aufzuteilen sind. Dazu müssen Pläne in einer Darstellung vorliegen, die alle Agenten interpretieren können. Außerdem müssen nicht nur Aufgaben verteilt, sondern auch Teilpläne zusammengefügt und synchronisiert werden.

Die bekanntesten Protokolle zum verteilten Problemlösen sind das *Contract-Net Protocol* und das *Partial Global Planning Protocol*.

Das Contract-Net Protokoll (Smith, 1977) fokussiert auf die Aufgabenverteilung. Hier zerlegen die Manager-Agenten die Aufgabe in Teilaufgaben und schreiben sie öffentlich aus. Auf die Ausschreibung bieten dann die Agenten. Die Aufgabe wird dem Agenten zugewiesen, der das beste Angebot abgibt. Dieser Agent, Kontraktor genannt, löst die an ihn übertragene Aufgabe und gibt die Lösung an den Manager zurück. Der Manager kombiniert abschließend die Lösungen der Teilaufgaben zu einer Gesamtlösung. Indem die Kontraktoren ihrerseits als Manager tätig werden, können sie Teilaufgaben delegieren, so dass das Contract-Net Protokoll ein verteiltes Teile-und-Herrsche Verfahren darstellt. Die selbstähnliche Struktur, bei denen Agentengruppen nach außen hin als eine Einheit agieren, sind als Holonen (Koestler, 1967) bekannt. Durch die Ausschreibung kann eine Aufgabenverteilung dynamisch festgelegt werden, die der aktuellen Verteilung von Wissen, Fähigkeit und Ressourcen der Agenten Rechnung trägt.

Das Partial Global Planning Protokoll (Durfee und Lesser, 1991) konzentriert sich stärker auf den Planungsaspekt. Es geht davon aus, dass eine Struktur existiert, die angibt, wie Teilpläne verteilt werden. Nach einer Zuweisungsphase der Aufgaben, erstellen die Agenten ihre lokalen Pläne, wobei sie dabei nur die ihnen zugewiesene Aufgabe sehen. Die lokalen Pläne enthalten dabei schon Alternativen, um die spätere Synchronisation der Pläne zu erleichtern. Die in den Teilplänen formulierten Teilziele werden von den Manager-Agenten zum Gesamtziel (engl. partial global goal) zusammengefasst. Außerdem werden die lokalen Pläne entlang des Gesamtziels ausgerichtet und miteinander synchronisiert. Der entstehende Plan bilden dann den globalen Plan (engl. partial global plan). In der nächsten Phase passen die Agenten dann ihre lokalen Pläne an den globalen an.

3.2.2 Konkurrenz: Verhandlungen

Konkurrenz liegt vor, wenn zwischen den Agenten kein Einvernehmen über das angestrebte Ziel besteht. Ohne dieses Einvernehmen stehen die Ziele der Agenten in Konkurrenz zueinander, und es liegt der Situationstyp *Wettbewerb* vor. Da Agenten in einer Konkurrenzsituation ihre Ziele nicht wie geplant realisieren können, ist im Interesse aller durch Verhandlungsprozesse ein Kompromiss zu finden.

Verhandlungsprozesse werden durch Protokolle geregelt. Bei Verhandlungsprotokollen kommt es auf die Einigungskriterien und die Kompromissmöglichkeiten an. Die grundlegende Annahme ist, dass die Akteure eigennützig handeln, sie sich also nur dann auf Verhandlungen einlassen, wenn ihnen der Kompromiss einen Vorteil bietet, wenn auch vielleicht nur einen geringeren, als wenn

sie sich auf Kosten der anderen hätten durchsetzen könnten. Ein eigennütziger Akteur wird also nur dann einen Kompromiss akzeptieren, wenn das Ergebnis für ihn optimal ist, d.h. dass es bei der aktuellen Interessenlage keine bessere Entscheidung gibt.

Die Spieltheorie hat diese Form der Entscheidungsfindung zum Forschungsgegenstand. Die Grundannahme ist, dass n Agenten eigennützig ihre Ziele verfolgen und dass mit dem Erreichen eines Ziels ein Gewinn verbunden ist. Das gesamte Szenario wird als *Spiel* aufgefasst. Die Entscheidungsfindung jedes Agenten A_i wird durch seine Spielstrategie S_i bestimmt. Die Strategie eines Agenten orientiert sich dabei an denen der anderen. Ein Spiel der Agenten ist somit mit den Strategien $(S_1, \ldots, S_n)$ der Agenten gleichzusetzen. Beispiele für solche Spiele sind Preisbildungsprozesse, Auktionen, Wahlen oder Koalitionsverhandlungen.

Auf den Bereich der Multiagentensysteme angewendet lautet eine Teilfrage, wie Verhandlungsprotokolle – der Markt und die Spielregeln gewissermaßen – gestaltet werden müssen, damit die lokal optimierte Handlungswahl auch auf globaler Ebene ein optimales Ergebnis darstellt – eine Fragestellung des *algorithmic mechanism design* (Steimle, 2008). Hierbei stellt sich die Frage, in welchem Verhältnis der Aufwand des Verhandlungsprotokolls zur Güte des Ergebnis stehen.

Aber schon allein die Formulierung des Optimalitätskriteriums gestaltet sich schwierig. Es gibt in der Literatur vier zentrale Formulierungen der Optimalität (vgl. Sandholm, 1999). Die erste Formulierung nennt eine Entscheidung optimal, wenn sie den kumulierten Gewinn aller Akteure maximiert. Hier wird also das Allgemeinwohl (engl. welfare) maximiert. Die zweite Formulierung nennt eine Entscheidung optimal, wenn sich kein Akteur verbessern kann, ohne dass sich mindestens ein anderer Agent verschlechtert (*Pareto-Optimalität*). Anders formuliert: Ein Agent kann sich nur auf Kosten anderer verbessern. Eine dritte Formulierung zeichnet sich dadurch aus, dass Akteure eine dominante Strategie wählen. Eine Strategie ist *dominant*, wenn sie für den Akteur optimal ist, unabhängig davon, was die anderen Akteure tun. Die wenigsten Spiele besitzen jedoch eine solche Strategie. Eine vierte Formulierung basiert auf den Begriff des Nash-Gleichgewichts. Die Strategien $(S_1, \ldots, S_n)$ sind im *Nash-Gleichgewicht*, wenn für alle A_i die Strategie S_i optimal ist, wenn die anderen Agenten nach den Strategien $(S_1, \ldots, S_{i-1}, S_{i+1}, \ldots, S_n)$ spielen. Das Problem hierbei ist, dass manche Spiele kein Nash-Gleichgewicht besitzen, andere dagegen mehrere. Ein weiteres Problem ist zudem noch, dass sich selbst im Nash-Gleichgewicht Agenten konspirativ zusammenschließen können, um auf Kosten der anderen ihren Gewinn zu verbessern.

Das Verhältnis der Optimalitätskonzepte wird meist mit dem Gefangenendilemma illustriert. Beim Gefangenendilemma stehen zwei Gefangene A und B vor der Wahl, entweder zuzugeben, eine Straftat begangen zu haben oder dies abzustreiten. Streiten beide ab, so werden beide wegen geringfügiger Vergehen bestraft. Gestehen beide, so wird die Strafe aufgeteilt. Gesteht dagegen nur einer, so wird nur der leugnende Gefangene bestraft. Formulieren wir den Nutzen als die vermiedene Strafe, so ergibt sich die folgende Nutzenmatrix:

	gestehen	abstreiten
gestehen	1,1	5,0
abstreiten	0,5	3,3

An dieser Situation erkennt man, dass der allgemeine Nutzen maximiert wird, wenn beide abstreiten. Der gemeinsame Nutzen ist dann $3 + 3 = 6$. Diese Wahl ist auch Pareto-optimal, denn bei der Verbesserung zu $(5, 0)$ (bzw. zu $(0, 5)$) verschlechtert sich der Partner jeweils. Die dominante Strategie dieses Spiels ist es aber zu gestehen, denn wenn B gesteht, dann ist es für A besser, auch zu gestehen, da für ihn $(1, 1)$ besser als $(0, 5)$ ist. Streitet B dagegen ab, so ist es für A wiederum besser zu gestehen, da für ihn $(5, 0)$ besser als $(3, 3)$ ist. Damit ist Abstreiten für A besser, unabhängig von der Wahl von B. Wählen beide Spieler die dominante Strategie, so ergibt sich das schlechteste Ergebnis $(1, 1)$. Diese Strategiewahl ist auch das Nash-Gleichgewicht.

Die verschiedenen Optimalitätskriterien kommen also für dieses Spiel zu entgegengesetzten Strategiewahlen mit unterschiedlichem Gesamtnutzen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese unterschiedlichen Ergebnisse nicht als Argument gegen die Spieltheorie oder gegen den rational-choice Ansatz verstanden werden dürfen. Vielmehr zeigt das Beispiel sehr schön, dass es Spiele gibt, bei denen lokale, egoistische Optimierung nicht zum globalen Optimum führt, sondern sogar zum denkbar schlechtesten Ergebnis. Aus der konstruktiven Perspektive besteht die Aufgabe also gerade darin, die Nutzenmatrix und damit auch die Spielregeln durch Mechanismen, also durch Ordnungspolitik, so anzupassen, dass lokale Nutzenmaximierung und Allgemeinwohl zusammenfallen.

3.3 Normative Agenten und Institutionen

Die bislang behandelten Kooperationsprotokolle gehen davon aus, dass alle Agenten eines Teams – wie im Partial Global Planning Protokoll – gutwillig an der Lösung arbeiten und die ihnen zugewiesenen Aufgaben erledigen (bene volence Eigenschaft). Da dieser Aspekt im allgemeinen zu einschränkend ist, werden für kooperative Situationen zusätzliche Sozialstrukturen berücksichtigt. Wir betrachten hier die Theorie der *joint-intentions*, bei der auch soziale Verpflichtungen der Mitglieder gegenüber der Gruppe modelliert werden.

Die Verhandlungsprotokolle besitzen den Nachteil, dass lokale Rationalität der Akteure – wie im Falle des Gefangenendilemmas – nicht zu global optimalen Lösungen führt. Ein möglicher Ansatz ist es hier, die Rationalität mit der Theorie normativer Agenten zu kombinieren. Hierbei werden Normen, d.h. Strukturen mit verbindlichem Regelungscharakter, in den Planungsprozess der Agenten einbezogen, mit der Hoffnung, dass hierdurch die Paradoxien nicht optimaler Strategiewahlen vermieden werden.

3.3.1 Kooperationslogik

Startpunkt der Arbeiten zum *Collaborative Decision-Making (CDM)* ist die Erkenntnis, dass geteilte Ziele nicht ausreichen, um kohärentes Gruppenhandeln

zu erzeugen. Daher werden die in der Gruppe geteilten Absichten zu Gruppenabsichten (engl. joint intentions) gebündelt und die einzelnen Akteure auf diese verpflichtet. Dieser Gedanke wird insbesondere in (Cohen und Levesque, 1991), (Jennings, 1993, 1996), (Castelfranchi und Conte, 1995a; Castelfranchi, 1995; Castelfranchi und Conte, 1996; Castelfranchi, 2000) und (Ossowski, 1999) vertreten. Wir betrachten im folgenden die logische Formalisierung des CDM-Prozesses nach Panzarasa, Jennings und Norman (2002).

Die BDI-Modalitäten beschreiben angestrebte Weltzustände, reden aber nicht über die Prozesse, die zu ihrer Erlangung führen. Dazu bedarf es einer Prozesslogik. Die grundlegendste Struktur basiert auf der *dynamic logic* nach Harel (1984), in der Operatoren existieren, mit deren Hilfe komplexe Aktionen aus atomaren zusammengesetzt werden. Es existieren die aus der Prozessalgebra (Baeten, 1990) bekannten Konstrukte der Sequenz $(e_i; e_j)$, der alternativen Auswahl $(e_i + e_j)$, der Nebenläufigkeit $(e_i \parallel e_j)$ und der Iteration e^*. Darüberhinaus existiert der Testprozess $(\phi?)$, der blockiert, falls ϕ nicht gilt, und andernfalls keine Wirkung hat.

Wenn I eine Zeitintervall ist, dann drückt $\mathsf{Occurs}(e)(I)$ aus, dass die komplexe Aktion e in I eintritt. Die Ausführenden sind die Agenten der Gruppe gr. Der Einfachheit halber wird ein Agent als einelementige Gruppe interpretiert. $\mathsf{Do}(gr, e)(I)$ drückt aus, dass die Gruppe gr die Aktion e in I ausführt:

$$\begin{array}{rcl} \mathsf{Do}(gr, e)(I) & \equiv & \mathsf{Occurs}(e) \wedge \mathsf{Agts}(gr, e)(I) \\ \mathsf{Does}(a, e)(I) & \equiv & \forall gr : \mathsf{Do}(gr, e)(I) \Longrightarrow \mathsf{Singleton}(gr, a)(I) \end{array}$$

Der Operator plan erlaubt es, Aktionen zu repräsentieren und darüber zu schließen. Zum Zeitpunkt t ist die Aktion e für die Gruppe gr ein Plan, um zum Zeitpunkt t' den Zustand ϕ zu erreichen (mit $t < t'$):

$$\mathsf{plan}(gr, e, \phi(t'))(t)$$

Ein Plan ist durch die Aktionssequenz e charakterisiert, die geeignet ist, den Zustand ϕ zum Zeitpunkt t' realisieren, wenn sie im Zeitintervall $[t_1, t_2]$ ausgeführt wird:

$$\begin{array}{rcl} \mathsf{plan}(gr, e, \phi(t'))(t) & \equiv & \exists t \leq t_1 \leq t_2 < t' : \\ & & \mathsf{Do}(gr, e)(t', t_2) \wedge (\mathsf{Occurs}(e)([t_1, t_2]) \Longrightarrow \mathsf{Occurs}(\phi?)(t')) \end{array}$$

Um Pläne abzugleichen, ist es notwendig, gemeinsame Überzeugungen zu beschreiben. Der Operator **E-Bel** beschreibt, dass zum Zeitpunkt t alle Mitglieder der Gruppe gr der Überzeugung sind, dass ϕ gilt:

$$\mathbf{E\text{-}Bel}(gr, \phi)(t) \equiv \bigwedge_{a \in gr} \mathbf{Bel}(a, \phi)(t)$$

Diese *allgemeine Überzeugungen* sind aber nicht reflexiv, d.h. die Agenten können gemeinsame Überzeugungen besitzen, ohne dass sie sich dessen bewusst wären. Um zu beschreiben, dass eine Gruppe von Agenten gemeinschaftliche Überzeugungen (*mutual beliefs*) besitzt, ist ein stärkerer Operator notwendig:

$$\mathbf{M\text{-}Bel}(gr, \phi)(t) \equiv \mathbf{E\text{-}Bel}^k(gr, \phi)(t) \text{ für alle } k$$

Dabei beschreibt $\textbf{E-Bel}^k(gr)$ das wechselseitige Wissen bis zur Stufe k:

$$\begin{aligned} \textbf{E-Bel}^0(gr,\phi)(t) &\equiv \phi(t) \\ \textbf{E-Bel}^{k+1}(gr,\phi)(t) &\equiv \textbf{E-Bel}(gr,\textbf{E-Bel}^k(gr,\phi)(t))(t) \end{aligned}$$

Analog zu **E-Bel** werden auch wechselseitige Bedürfnisse (**E-Des**), Ziele (**E-Goal**) und Absichten (**E-Int**) definiert.

Wechselseitige geteilte Überzeugungen, Ziele usw. sind aber immer noch sehr schwach. Nötig sind *gemeinschaftliches* mentale Zustände. Eine Gruppe gr besitzt eine *gemeinschaftliches Bedürfnis*, notiert: $\textbf{J-Des}(gr,\phi)(t)$, wenn folgendes gilt:

1. Jeder Agent $a \in gr$ hat ein Bedürfnis bezüglich ϕ.
2. Es besteht gemeinschaftliche Überzeugung, dass jeder Agent ein Bedürfnis bezüglich ϕ hat.
3. Jeder Agent hat die Absicht, dass alle anderen Agenten aus gr ein Bedürfnis bezüglich ϕ haben.
4. Es besteht gemeinschaftlich Überzeugung über den vorherigen Punkt.

Diese vier Bedingungen lassen sich folgendermaßen formalisieren:

$$\begin{aligned} \textbf{J-Des}(gr,\phi)(t) \equiv\ & \textbf{E-Des}(gr,\phi)(t) \\ \wedge\ & \textbf{M-Bel}(gr,\psi)(t) \\ \wedge\ & \textbf{E-Int}(gr,\psi)(t) \\ \wedge\ & \textbf{M-Bel}(\textbf{E-Int}(gr,\psi))(t) \\ & \text{mit } \psi = \textbf{E-Des}(gr,\phi)(t) \end{aligned}$$

Die Operatoren **J-Goal** und **J-Int** für gemeinschaftliche Ziele und Absichten werden analog definiert.

Gemeinschaftliche Bedürfnisse reichen nicht aus, den Grad der Verbindlichkeit innerhalb der Gruppe zu gewährleisten, der notwendig ist, um eine gemeinsame Aktion auszuführen. Als weiteres notwendiges Konstrukt ist das Konzept der *Verpflichtung* (engl. commitment) zu sehen. Verpflichtungen bündeln die von Gruppen geteilte Absichten (engl. joint intentions) in einem überindividuellen Element. Als zusätzliche Persistenz-Bedingung zum Sicherstellen gemeinschaftlichen Handelns dienen *soziale Verpflichtung* (engl. social commitments), mit denen sich die Gruppe gr_1 gegenüber der Gruppe gr_2 zur Ausführung der Aktionssequenz e verpflichtet:

$$\mathsf{Comm}(gr_1, gr_2, e)(t)$$

Analog wird durch $\mathsf{Comm}(gr_1, gr_2, \psi(t'))(t)$ beschrieben, dass sich die Gruppe gr_1 zum Zeitpunkt t gegenüber gr_2 verpflichtet, zum Zeitpunkt t' den Zustand ψ herzustellen. Gemeinschaftliche Absichten heißen persistent (engl. persistent joint intentions), falls sie durch soziale Verpflichtungen entsprechend gestärkt sind.

Hiermit wird das Konzept der gemeinsamen sozialen Verpflichtung (engl. *joint commitment*) entwickelt. Zum Zeitpunkt t besitzt die Gruppe gr eine gemeinsame soziale Verpflichtung bezüglich des Erreichens von ϕ zum Zeitpunkt t', wenn es für gr eine persistente gemeinsame Absicht bezüglich $\phi(t')$ gibt:

1. Die Gruppe gr ist der Überzeugung, dass ϕ zum Zeitpunkt t' wahr sein wird.
2. gr besitzt eine gemeinsame Absicht, dass ϕ zum Zeitpunkt t' wahr sein wird.
3. Jeder Agent $a \in gr$ hat sich sozial gegenüber der Gruppe gr bezüglich dieser gemeinsamen Absichten verpflichtet.
4. In der Gruppe gr besteht gemeinschaftliche Überzeugung bezüglich (3).
5. Es ist wahr und gemeinschaftliche Überzeugung, dass (2) solange gilt, bis entweder gr gemeinschaftlich der Überzeugung ist, dass ϕ zum Zeitpunkt t' falsch sein wird, oder mindestens ein Agent die Gruppe verlässt.

Der fünfte Punkt beschreibt die einzige Möglichkeit, einer sozialen Verpflichtung nicht nachzukommen. Formal wird eine soziale Verpflichtung durch die fünf Konjunkte des folgenden Ausdrucks beschrieben:

$$\begin{aligned}\textbf{J-Comm}(gr, \phi(t'))(t) \quad \equiv \quad & \textbf{M-Bel}(gr, \phi(t'))(t) \wedge \\ & \textbf{J-Int}(gr, \phi(t'))(t) \wedge \\ & \bigwedge_{a \in gr} \Big(\mathsf{Comm}(a, gr, \phi(t')) \\ & \qquad \wedge \textbf{M-Bel}(gr, \mathsf{Comm}(a, gr, \phi(t'))) \Big)(t) \wedge \\ & \gamma(t) \wedge \textbf{M-Bel}(gr, \gamma))(t)\end{aligned}$$

Die Formel γ drückt dabei den fünften Punkt aus: Entweder ϕ ist gemeinschaftliche Überzeugung oder die Gruppe gibt diese zum Zeitpunkt t_2 auf. Dies ist entweder der Fall, wenn die Gruppe gemeinschaftlich der Überzeugung ist, dass ϕ zum Zeitpunkt t' falsch sein wird, oder wenn mindestens ein Agent a seiner sozialen Verpflichtung nicht nachkommt. Die gemeinsame Absicht gilt aber dann bis zum Zeitpunkt t_2:

$$\begin{aligned}\gamma \equiv \textbf{J-Int}(gr, \phi(t'))(t) \vee & \\ \exists t < t_2 < t' : \quad & \Big[\textbf{M-Bel}(gr, \neg\phi(t')) \\ & \quad \vee \exists a \in gr : \big(\neg\mathsf{Comm}(a, gr, \phi(t')) \\ & \qquad \wedge \textbf{M-Bel}(gr, \neg\mathsf{Comm}(a, gr, \phi(t'))) \big) \Big](t_2) \\ \wedge \quad & \forall t < t_1 < t_2 : \textbf{J-Int}(gr, \phi(t'))(t_1)\end{aligned}$$

Besteht eine soziale Verpflichtung $\textbf{J-Comm}(gr, \phi(t'))(t)$, dann können alle Gruppenagenten sicher sein, dass kein Mitglied seine Absichten spontan ändert, ohne dass dazu Gründe vorliegen, die die gemeinsamen Absichten tangieren. Auf diese Art und Weise wird eine größere Verbindlichkeit und damit auch eine größere Planungssicherheit erreicht.

3.3.2 Normativ handelnde Agenten

Das Konzept der Norm wurde eingeführt, um zwischen der lokalen, d.h. individuellen Rationalität der Agenten und den global erwünschten Prozessen eine Verbindung herzustellen (für eine soziologische Perspektive zum Nutzen der Norm für kooperative Agenten siehe auch Saam, 2001). Diese Abkehr von der Theorie der rationalen Handlungswahl (engl. rational choice) stellt zunächst einmal die Grundannahme in Frage, dass Agenten im Rahmen ihrer Logik rational handeln.

Als Gegenentwurf zum rational handelnden *homo oeconomicus* dient hierzu der *homo sociologicus*, der in seiner Handlungswahl nicht von einer Kosten-Nutzen Abwägung, sondern von normativen Kategorien geleitet wird (vgl. dazu auch die Darstellung in Kapitel 5.2). Auch die Wirtschaftswissenschaften teilen mittlerweile diese Auffassung, da die Empirie zeigt, dass die Akteure des Marktes sich in der Realität im Sinne einer Gewinnmaximierung nicht rational verhalten.

Ullman-Margalit (1977) gibt verschiedene rationale Funktionen für Normen an. Erstens verbessern Normen die Kooperation zwischen Agenten, indem sie lokal den Suchraum beschränken. Normen dienen dann der Komplexitätsreduktion. Zweitens verbessern Normen in sozialen Dilemmata die Strategiewahl, indem sie lokal rationales, aber global unerwünschtes Verhalten ausblenden und so den Gesamtnutzen verbessern. Die Wirkung von Normen wurde in Simulationsversuchen exemplarisch bestätigt (vgl. Shoham und Tennenholtz, 1994; Walker und Wooldridge, 1995).

Für die Modellierung stellt sich die Frage, wie das Verhältnis von normativem und rationalem Handeln zu fassen ist. Intuitiv erwarten wir, dass sich normative Agenten anders verhalten sollten als langfristige planende Kosten-Nutzen-Maximierer. Man kann sogar fragen, ob sich beide Konzepte – Rationalität und Normativität – miteinander vereinbaren lassen oder ob sie einander ausschließen. Dies ist identisch mit der Frage, ob Normen überhaupt im Rahmen der planenden Handlungswahl formalisierbar sind, denn sobald Normen Bestandteil der Planung sind, verschwindet der Gegensatz zwischen rationalem und normativem Handeln, da dann normatives Verhalten rational ist. Beispielsweise mag ein Verhalten, das auf kurze Sicht nicht optimal im Sinne von Kosten-Nutzen Erwägungen ist, dies sehr wohl für einen größeren Betrachtungszeitraum sein. Als Konsequenz ergibt sich Normativität – obgleich sie von den Akteuren gar nicht berücksichtigt oder angestrebt wird – von allein, quasi durch die „unsichtbare Hand des Marktes“ und individueller Nutzenmaximierung.

Derartige Überlegungen geben uns leider keinerlei Hinweis auf die Strukturen, mit denen die Handlungswahl erfolgt, denn logisch gesehen kann die Beeinflussung von Rationalität und Normativität sogar umgekehrt sein, d.h. die rationale Handlungswahl kann Nebenprodukt normativ geleiteter Prozesse sein. Rationalität und Normativität können sogar von einem Mechanismus erzeugt werden, der keinerlei direkten Bezug zu beiden Aspekten aufweist. Die Frage ist daher nicht, welche die „richtige“ Struktur ist, sondern welche besonders beschreibungsökonomisch ist. Von dieser Prämisse ausgehend ist es sinnvoll, Normen als Teil der Handlungswahl direkt zu breücksichtigen. Konsequenterweise betrachten Castelfranchi und Conte (1995c,b,a) Agenten, deren Planen von nor-

mativen Elementen bestimmt wird. Um normkonformes Handel programmieren zu können, sind Normen geeignet zu repräsentieren. Hierzu sind mehrere Modellierungsformen denkbar. Castelfranchi und Conte (1995b) schlagen folgende Varianten vor:

1. Normen sind als Randbedingungen (engl. constraints) formuliert, die jeder Planungsprozess zu erfüllen hat. Normen sind somit der Planung an sich entzogen, wodurch zunächst offen bleibt, wie die Dynamik der Normen zu konzeptionalisieren ist.

2. Normen sind spezielle Ziele eines Agenten, sie werden also von der Planung mit angestrebt. Agentenkonzepte, die diesem Ansatz folgen, operieren mit einem differenzierten Begriff eines *Ziels*. Ziele können individuellen Charakter besitzen, sie können in einer Agentengruppe geteilt werden oder sie können sogar normativer Natur sein.

3. Normen sind eigenständige Objekte des Planungsprozess, die sich insbesondere von Zielen unterscheiden. Es gibt normative Überzeugungen und Regeln, nach denen eine Norm für einen Agenten handlungsleitend wird.

Der erste Ansatz hat zur Konsequenz, dass es Agenten nicht möglich ist, gegen Normen zu verstoßen, was im zweiten und dritten Fall sehr wohl möglich ist, da ein Agent Ziele bzw. normative Erwartungen gegeneinander abwägen kann. Auch ist es nicht möglich, dass sich Normen verändern, da der Agent im Rahmen seiner Planung keinerlei Zugriff auf die Darstellung der Randbedingungen nehmen kann. Normen können so nicht emergieren oder sich über die Zeit verändern. Sie sind statisch programmiert.

Verglichen mit der dritten Variante ist das Normkonzept des zweiten Ansatzes sehr schwach, denn Normen werden stets den „normalen“ Zielen untergeordnet, sobald sich deren Verfolgung als lohnender darstellt. Normen haben also im Extremfall keinerlei Verbindlichkeit für den Agenten.

Castelfranchi und Conte (1995b) argumentieren daher für den dritten Ansatz, der den Normen eine eigenständige Rolle zuweist. Eine Architektur, die dem dritten Ansatz folgt, wird in (Castelfranchi u. a., 1999) vorgestellt. Dieser Ansatz ist sehr flexibel, da er Deduktion über dem Normensystem erlaubt. Die generelle Frage ist für diesen Ansatz, unter welchen Umständen sich ein Agent seine normative Überzeugungen zu eigen macht (engl. norm adoption).

Wir betrachten im folgenden die Formalisierung nach (Castelfranchi und Conte, 1999). Normative Annahmen eines Agenten a über die Aktion e für die Gruppe gr sind als die Verpflichtung aller Gruppenmitglieder, die Aktion e auszuführen, formalisiert (engl. normative believe):

$$\mathbf{NBel}(a, gr, e) \equiv \bigwedge_{a' \in gr} \mathbf{Bel}(a, \mathsf{Ought}(\mathsf{Does}(a', e)))$$

Ein Agent glaubt an die Relevanz einer Norm für sich, wenn er glaubt, zur Agentengruppe zu gehören, die von der Norm angesprochen wird (engl. normative believe of pertinence):

$$\mathbf{PNBel}(a, e) \equiv \mathbf{NBel}(a, gr, e) \wedge \mathbf{Bel}(a, a \in gr)$$

Normative Ziele werden mit Hilfe der Modalität der relativen Ziele formalisiert. Hierbei bedeutet $\mathbf{R\text{-}Goal}(a, \phi, \psi)$, dass der Agent a das Ziel ϕ verfolgt, solange er glaubt, dass ψ gültig ist. Damit ergibt sich die Formalisierung normativer Ziele:

$$\mathbf{N\text{-}Goal}(a, e) \equiv \mathbf{R\text{-}Goal}(a, \mathsf{Does}(a, e), \mathbf{PNBel}(a, e))$$

Dies bedeutet, dass der Agent a das normative Ziel bezüglich e besitzt, wenn er das Ziel hat, e auszuführen – und dies solange er sich dazu normativ verpflichtet fühlt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich dieser Ansatz durch eine explizite Repräsentation normativer Verpflichtungen auszeichnet. Die Darstellung der Normen ist dabei klar getrennt von denen der Ziele. Normen und Ziele sind im Rahmen des Planungprozesses miteinander verkoppelt. Der Agent entscheidet selbst, wann er sich welche Normen zu eigen macht.

3.4 Multiagentensystemorganisationen

Bislang haben wir Agentensystemen so betrachtet, als wären die Agenten egalitär: Jeder Agent kann mit jedem kommunizieren, d.h. dass das soziale Netzwerk zwischen den Agenten vollständig vermascht ist. Es wird meist implizit davon ausgegangen, dass die relevanten Agenten einander bekannt sind, bzw. einander anhand eines Namensdienstes leicht auffinden können.

Dieser Ansatz ist offensichtlich nur für eine geringe Anzahl von Agenten praktikabel. Überschreitet die Agentenpopulation eine bestimmte Größe, so ist eine explizite Interaktion aller mit allen praktisch nicht mehr möglich. Vielmehr ist eine Strukturierung notwendig. Außerdem hat die direkte Kommunikation den Nachteil, dass das Agentensystem kein von den Agenten unabhängiges Gedächtnis besitzt, da Agenten einander stets nur als Individuen begegnen. Ein strukturelles Gedächtnis – kodiert in Erwartungen, Rollen, Positionen, Netzwerken usw. – hilft im allgemeinen, die eigentlichen Interaktionen zu flankieren. Mit Hilfe des strukturellen Gedächtnisses können Agenten darauf bauen, dass andere ihren Rollen gerecht werden. Dies ist wichtig für Situationen, die Erwartungssicherheit verlangen. Agenten bringen also in erster Linie der Rolle und erst in zweiter Linie ihrem Träger Vertrauen entgegen. Ohne strukturelles Gedächtnis können Agenten Vertrauen dagegen nur Individuen entgegenbringen und sind somit gezwungen, dieses stets individuell neu aufzubauen.

Eine solche Systemstruktur drückt sich im Konzept der *MAS-Organisation* aus (siehe dazu Ferber u. a., 2003; Boissier u. a., 2005). Es mag auf den ersten Blick verwundern, dass an dieser Stelle der Systemstruktur ähnliche Attribute zugesprochen werden wie einem Agenten – speziell Intelligenz und Lernfähigkeit. Aber bereits Müller (1993) geht von dem VKI-Konzept der *organisationellen Intelligenz* aus. Organisationen verfügen hiernach über Kenntnis der Organisationsziele, über Wissen der Handlungsalternativen, über die Fähigkeit, die jeweils beste Handlungsalternative zu erkennen, auszuwählen und zu verfolgen. Sie verfügen über Lernfähigkeit und sogar über ein organisationelles Gedächtnis. Das

Petrinetz in Abbildung 3.6 illustriert die elementaren Beziehungen einer Organisation, die mittels ihrer Organisationsmitglieder sowohl die Organisationsziele koordinativ umsetzt als auch die Organisationsparameter überwacht und mit den Zielen rückkoppelt.

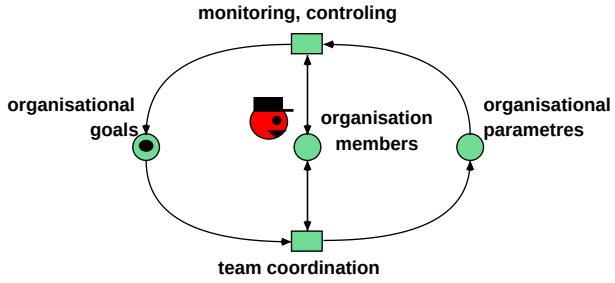


Abbildung 3.6: Multiagentensystemorganisation

Obwohl das Konzept der Organisation als überindividuelles Konstrukt schon länger in der VKI diskutiert wird, bildet sich eine Organisationstheorie der Multiagentensysteme gerade erst unter dem Stichwort der *Computational Organsisation Theory* heraus (vgl. dazu Prietula u. a., 1998; Carley und Gasser, 1999). Diese Theorie hat ihre Wurzeln sowohl in der VKI als auch im Operations Research und der theoretischen Betriebssoziologie.

Organisationen dienen dazu, die Einschränkungen von Akteuren zu überwinden. Die größte Einschränkung ist dabei die Tatsache, dass Akteure als beschränkt-rational anzusehen sind, d.h. ihre Handlungswahl ist geprägt von unvollständiger Information und beschränkten Ressourcen (wie Zeit, Geld etc.). Organisationen sollen die resultierende Suboptimalität kompensieren, indem sie beispielsweise Mechanismen entwickeln, die definieren, welche Informationen aus der Umwelt als wichtig zu erachten sind und welche Substrukturen der Organisation auf die relevanten Informationen zu reagieren haben. Zudem wird noch definiert, wie dies geschehen soll, d.h. die Abläufe und die daran beteiligten Akteure sind festgelegt. Organisationen bilden also einen ordnenden Rahmen für die Handlungen der beteiligten Agenten, wobei meist unterstellt wird, dass – zumindest implizit – die Kriterien, nach denen diese Rahmung erfolgt, zielgeleitet sind. Dieser Rahmen dient u.a. dazu, die Unsicherheit der Umwelt zu begrenzen und damit auch den Koordinierungsaufwand und die Entscheidungskomplexität zu reduzieren – idealerweise sogar zu minimieren.

Kurzgesagt sind Organisationen somit vorstrukturierte Systeme, in denen sich Rollen, Normen etc. konzentrieren. Organisationsformen dienen dabei auf der Meso-Ebene der Strukturierung von Interaktion zwischen Organisationsmitglieder und auf der Makro-Ebene der Koordination zwischen verschiedenen Organisationen (vgl. Schillo und Spresny, 2005).

Die konkrete Ausgestaltung einer Organisation zu einer gegebenen Aufgabe hängt von verschiedenen Faktoren ab: Zum einen natürlich von der Aufgabe selbst, zum anderen aber auch von dem Wissen und den Fähigkeiten der Akteure. Daneben spielt die Dynamik der Umgebung eine große Rollen, denn die notwendigen Reaktionszeiten schließen von vorherein gewisse Organisationsstruk-

turen aus. Nicht zuletzt spielt noch eine Rolle, welches Optimalitätskriterium man heranzieht. Hier kann je nach Kontext auf maximale Effizienz, geringes Risiko, minimale Kosten, maximalen Gewinn oder optimale Qualität Wert gelegt werden.

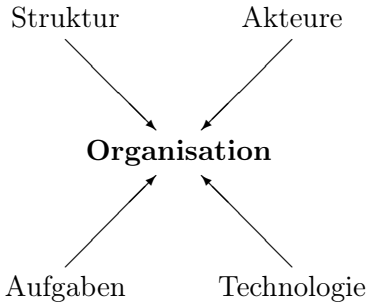


Abbildung 3.7: Die Organsiationsperspektiven nach Carley und Gasser (1999)

Folgt man Carley und Gasser (1999), dann existieren viel zentrale Organisationsperspektiven: Die Perspektive der Aufgaben, der Akteure, der Strukturen und der verfügbaren Technologien.[4] Die *Aufgaben*, denen sich eine Organisation stellt, können nach verschiedenen Parametern klassifiziert werden. Beispiele für solche Parameter sind der Koordinierungsbedarf (Ist die Aufgabe isoliert zu erledigen oder ist sie in einen Gesamtkontext eingebunden?), der Grad der Wiederholung (Handelt es sich um eine Routineaufgabe oder um neuartige Anforderung?), die Dynamik der Umgebung (Ist die Umgebung während der Bearbeitung weitesgehend stabil oder verändern sich die Anforderungen laufend?), die Komplexität (Sind einige wenige oder sehr viele Parameter zur Bearbeitung heranzuziehen?), der Grad der Spezialisierung (Sind nur wenige oder sehr viele verschiedene Fähigkeiten zur Bearbeitung notwendig?) und der Ressourcenbedarf (Ist der Bedarf hoch oder niedrig?). Die konkrete Zusammensetzung aller Parametersätze und ihre zu erwartende Entwicklung über die Zeit bestimmt, welche Organisationsformen sich positiv auf die potentielle Bearbeitbarkeit auswirken.

Die *Organisationsstrukturen* definieren sich klassischerweise anhand eines Netzwerkes. In Unternehmen beschreiben die Knoten dieses Netzwerkes die Struktur zwischen den Positionen. Es existieren verschiedene Erscheinungsformen der Organisation. Die bekanntesten Formen sind nach Horling und Lesser (2005a) die folgenden:

- Hierarchien: Die Agenten kommunizieren nur mit ihren Nachbarn in der Hierarchie, die eine baumartige Struktur besitzt. Typischerweise verläuft die Delegation in Richtung der Blätter, während die Verantwortlichkeit auf die Wurzel zielt.

- Koalitionen: Agenten schließen sich zu Koalitionen zusammen, um den

[4] Wir geben an dieser Stelle nur einen kurzen Einblick in die Organisationstheorie. Für eine umfangreichere Darstellung der soziologischen Organisationstheorie verweisen wir auf Kapitel 5.4.

individuellen Nutzen der Mitglieder zu steigern. Koalitionen treten nach außen als eine Einheit auf. Der Zusammenschluss ist auf das Fortbestehen des gemeinsamen Nutzens beschränkt.

- Teams: Agenten schließen sich zu Teams zusammen, um eine gemeinsame Aufgabe kooperativ lösen zu können. Ähnlich zu Koalitionen ist ein Team in seinem Bestehen auf die Dauer des gemeinsamen Ziels beschränkt.

- Kongregationen: Hierbei handelt es sich um einen Zusammenschluss, der nicht auf einen konkreten Nutzen oder ein konkretes Ziel ausgerichtet ist. Stattdessen schließen sich hier Agenten mit ähnlichen Fähigkeiten und Interessen zu langfristig operierenden Einheiten zusammen.

- Föderation: Hierbei schließen sich Agenten zu Teilgruppen zusammen. Jede Teilgruppe wird von einem Delegierten (engl. mediator) gegenüber den anderen Delegierten vertreten.

- Holonische Organisation: Holonen sind rekursiv geschachtelte Strukturen, die nach außen als ein Agent betrachtet werden. Sie sind somit sowohl mit dem hierarchischen Organisationstyp als auch mit der Föderation verwandt.

- Matrix-Organisationen: Hier wird die Aggregationsbeziehung flexibilisiert. Während bei Hierarchien, Holonen oder Föderation jeder Agent in einer Einheit aggregiert ist, gibt es in der Matrix mehrere Vertreter.

- Märkte: In elektronischen Märkten organisieren sich Anbieter und Kaufinteressierte. Im Gegensatz zu anderen Formen stehen die Akteure eines Marktes stets in Konkurrenz zueinander.

- Gesellschaften: Es finden sich Agenten mit heterogenen Zielen und Fähigkeiten zusammen und entwickeln dabei eigene soziale Konventionen und Normen.

Diese Netzwerke legen zumeist die Verantwortlichkeiten und Kompetenzen zwischen Positionen fest, beispielsweise die Weisungs- oder die Delegationsbefugnis. Die Knoten dieses Netzwerks bilden hierbei die *Positionen*, die definieren, welche Rollen der Positionsinhaber einnehmen kann bzw. muss; welche Ressourcen er mobilisieren kann usw. Eine *Rolle* definiert dagegen situationsbezogen, welche Aktionen ausgeführt werden dürfen bzw. welche ausgeführt werden müssen, d.h. die *Rechte* und *Pflichten* einer Rolle.

Die Akteure einer Organisation sind nun als Organisationsmitglieder die Inhaber der *Positionen*. Jeder Akteur besitzt Wissen und Fähigkeiten, im Idealfall mindestens jene, die zur Ausübung der mit seiner Position verbundenen Rollen notwendig sind. Bedingt durch seine lokale Einbettung in den Organisationszusammenhang besitzt ein Akteur im allgemeinen nur eine eingeschränkte Sicht auf die Organisation, woraus sich Divergenzen von organisational intendierten und empirisch beobachtbaren Verhalten erklären lässt.

Technologien sind von der Umwelt bereitgestellte Mechanismen, die sich eine Organisation prinzipiell nutzbar machen kann, vorausgesetzt ihre Akteure sind

in der Lage, diese zu verwenden. Komplexe Maschinen oder Kommunikationsmedien sind in diesem Sinne eine Technologie, denn sie stehen im Prinzip jeder Organisation zur Verfügung, gleichzeitig ist aber offen, ob die Organisationsmitglieder sie bedienen können. Technologien bestimmen somit, wie organisationale Absichten tatsächlich operationalisiert werden, welche Ressourcen dazu jeweils notwendig sind und welche Fähigkeiten auf seiten der Akteure notwendig sind.

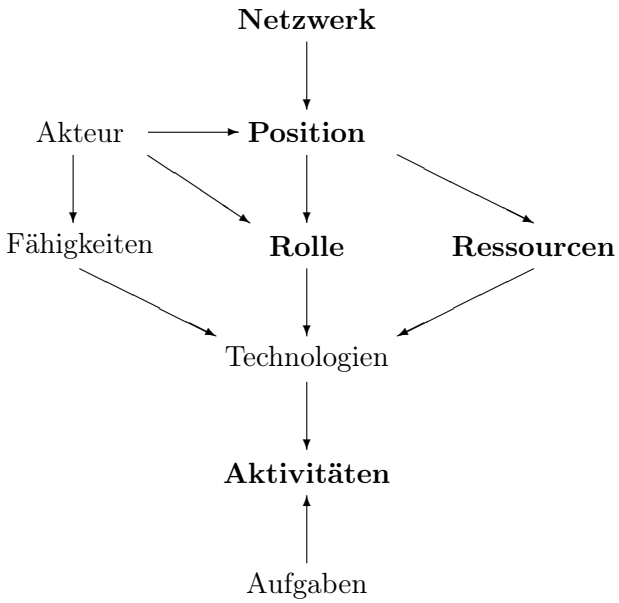


Abbildung 3.8: Die Relationen zwischen Organisationskonzepten

Die Abhängigkeiten der Konzepte sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Elemente, die der formalen Organisation zuzuordnen sind (Netzwerk, Position, Rolle etc.) sind gegenüber den informalen, externen Elemente (Akteure, ihre Fähigkeiten, Technologien und die Aufgaben der Organisation) hervorgehoben.

3.4.1 Offene Plattformen als Organisationen

Organisationen spielen insbesonders für *offene Agentensysteme* eine zentrale Rolle. Offene Agentensysteme zeichnen sich durch eine dynamische Agentenpopulation aus, die sich ergibt, indem die vorhandenen Agenten das System verlassen und neue es betreten. Bekanntestes Beispiel hierfür sind Plattformen aus dem Bereich des elektronischen Handels (engl. electronic commerce): Die Aufgabe einer Handelsplattform ist es, Verkäufer und Käufer zusammenzubringen und sie bei der Preisverhandlung sowie der Vertragsabwicklung zu unterstützen (vgl. Abbildung 3.9). Die konkreten Verkäufer- und Käuferagentenagenten (hier: $V_1, \ldots, V_m$ und $K_1, \ldots, K_n$) variieren über die Zeit hinweg. Als weitere Besonderheit offener Systeme kommt hinzu, dass diese Agenten extern entwickelt werden. Dies hat für die Entwicklung einer Handelsplattform zur Konsequenz, dass es nicht möglich ist, das Verhalten der auf der Plattform agierenden Agenten vorab adäquat zu gestalten. Um den ordnungsgemäßen Ablauf zu gewährleisten

ist es jedoch unumgänglich, das Verhalten der Agenten geeignet einzuschränken. Da dies aufgrund der Autonomie der Agenten nicht möglich ist, werden von der Plattform stattdessen Rollen und Interaktionsprotokolle (hier: *Verkäufer* und *Käufer*) spezifiziert und die Agenten auf das so definierte Verhalten festgelegt – beispielsweise durch Kontroll- und Sanktionierungsmechanismen.

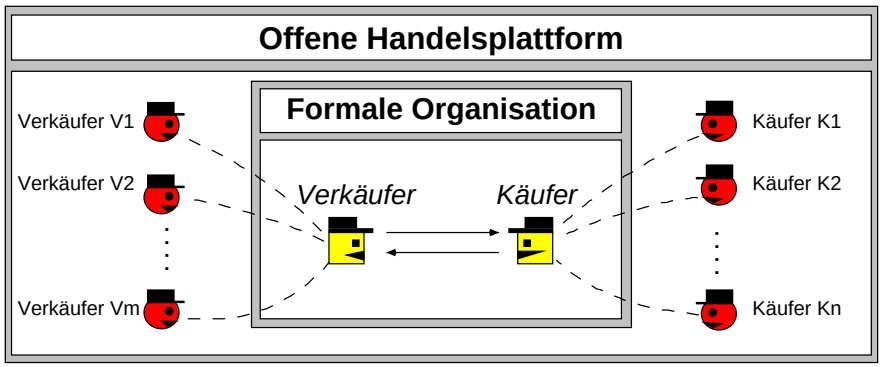


Abbildung 3.9: Eine offene Handelsplattform

Hier sieht man sofort, dass für die Entwicklung einer Handelsplattform überindividuelle Konstrukte von großem Nutzen sind. Die Handelsplattform ist somit das Paradebeispiel einer formalen Organisation (siehe dazu auch Kapitel 5.4) da die strukturell getrennte Entwicklung von Plattform einerseits und Käufer- und Verkäuferagenten andererseits eine analytische Aufspaltung des Systems in den formalen und den informellen Anteil notwendig macht. Dies ist ein großer Unterschied zu betrieblichen Organisationsformen, bei denen eine Trennung in formale und informelle Organisation stets nur bis zu einem gewissen Grade möglich ist.

3.4.2 Agentenorientierte Softwareentwicklung

Die agentenorientierte Softwareentwicklung (AOSE) betrachtet das Agentenkonzept als Fortführung des Objektkonzeptes. Jennings (2000) argumentiert, dass die agentenorientierte Softwareentwicklung genau die Aspekte bereitstellt, die Booch (1992) als zentrale Mechanismen zur Bewältigung der Komplexität moderner Software ansieht:

1. Abstraktion: Es wird nicht das komplette Modell erstellt, sondern zu verschiedenen Phasen werden nur ausgesuchte Aspekte modelliert. Hier unterstützt das Autonomiekonzept den Entwickler, indem es ihm erlaubt, Agenten so zu implementieren, dass sie nur auf eine Teilmenge der Kommunikationen eingehen.

2. Dekomposition: Das System wird so lange in Subsysteme zerlegt, bis diese eine beherrschbare Größe erreichen. Die Agentenmetapher unterstützt diese Trennung, indem sie bereits Hinweise bereithält, entlang welcher Linien die Trennung zu erfolgen hat – nämlich entlang von Ressourcen, Wissen, Fähigkeiten usw.

3. Hierarchie/Organisation: Hierbei geht es darum, wie die Subsysteme in einen funktionalen Zusammenhang integriert werden können. Die Modellierung der MAS-Organisation stellt sich genau diese Frage und analysiert die Interaktion in Bezug auf Rollen, Positionen und Kommunikationsstrukturen.

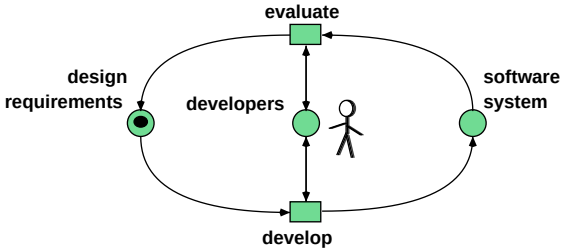


Abbildung 3.10: Iteratives Entwicklungsmodell

Im Rahmen der Softwareentwicklung bilden Entwicklungsmodelle, die auf dem iterativen Prozess der Abbildung 3.10 basieren, eine hervorgehobene Stellung. Im Rahmen der agentenorientierten Softwareentwicklung haben sich zahlreiche Spezialisierungen dieser Entwicklungsmodelle herausgebildet, beispielsweise MASE (DeLoach u. a., 2001), GAIA (Zambonelli, Jennings und Wooldridge, 2003), TROPOS (Bresciani u. a., 2004), OMNI (Dignum u. a., 2004), MOISE (Boissier u. a., 2000) und ODML (Horling und Lesser, 2005b), um einige zu nennen. Beim der agentenorientierten Softwareentwicklung ist festzulegen, wie Agenten modelliert werden, d.h. welche Ontologie verwendet wird, wie ihr Wissen und ihre Ziele modelliert werden und mit welchen Interaktionsprotokollen sie in welchen Rollen mit anderen Agenten interagieren. Bei dieser Modellierung liegt der Fokus auf den Agenten des Systems. Betrachtet man das Multiagentensystem dagegen unter dem Fokus des Systems, so stellt man fest, dass mit der Analyse der Rollen und der Agenten-Interaktionen die Systemstruktur noch nicht festgelegt ist. Es sind noch die Organisationsstrukturen (Positionen, Netzwerke usw.) zu definieren, in die Agenteninteraktionen eingebettet sind. Wir unterscheiden im folgenden zwischen der funktionalen Perspektive, die sich in ihrer Natur auf die statische Typisierung von Agenten bezieht, und der strukturellen Perspektive, die sich auf die Interaktionsnetzwerke bezieht.

Funktionale Typisierung Eine offene Frage ist, welchen Grad der Spezialisierung und der Redundanz die einzelnen Agenten aufweisen sollen. Die Spezialisierung ist hierbei ein qualitativer Aspekt, die Redundanz ein quantitativer. Diese Fragestellung betrifft das statische Design eines Multiagentensystems an. Ferber (1999) spricht in diesem Zusammenhang von der *funktioneller Analyse* der MAS-Organisation. Die – zum Teil einander entgegengerichteten – Anforderungen lassen sich folgendermaßen beschreiben:

- Die Spezialisierung soll einerseits die größtmögliche Aufgabenfokussierung leisten und

- andererseits mit dem kleinstmöglichen Koordinierungsaufwand auskommen.
- Die Redundanz soll einerseits den größtmöglichen Durchsatz erlauben und
- andererseits mit dem kleinstmöglichen Ressourceneinsatz auskommen.

Das eine Extrem bezüglich der Spezialisierung ist der omni-potente Agent, der alle Rollen realisiert. Er hat einen sehr geringen Koordinationsoverhead, da alle Kommunikation intern realisiert wird. Er ist allerdings sehr komplex und daher schwer zu warten. Das andere Extrem ist die Spezialisierung von Agenten auf genau eine Rolle, was die größtmögliche Trennung von Aufgaben bedeutet, aber meist auch einen maximalen Koordinierungsaufwand.

Auch bezüglich der Redundanz ergeben sich im allgemeinen entgegengesetzte Anforderungen: Die Rollen, die potentielle Engpässe darstellen, weil sie besonders nachgefragt sind oder ihr Ausfall kritisch wäre, sollten redundant ausgelegt sein. Dies kann bedeuten, dass mehrere Agenten sich die Aufgabenlast teilen oder dass ein Agent im Notfall für einen ausgefallenen Agenten „einspringen“ kann. Im allgemeinen sind die Ressourcen jedoch begrenzt, so dass nur ein begrenztes Maß an Redundanz realisiert werden kann.

Interaktionsstrukturen Neben dem statischen Design ist weiterhin die Dynamik des Systems zu entwerfen. Noch offene Designentscheidungen betrffen beispielsweise die Kommunikationsinfrastruktur des Systems, d.h. wer mit wem kommunizieren kann; welche Agenten wem gegenüber Arbeit delegieren dürfen usw. Ferber (1999) spricht hier von *struktureller Analyse*. Die Anforderungen lassen sich folgendermaßen beschreiben:

- Die Systemstruktur soll die größtmögliche Flexibilität in Hinblick auf die Aufgabenbewältigung bieten.
- Sie soll mit dem kleinstmöglichen Aufwand an Ressourcen (Nachrichtenkomplexität etc.) auskommen.

Dies lässt sich an einigen Extremfällen illustrieren. Eine Teamstruktur mag sich dadurch auszeichnen, dass keine Hierarchien existieren, jeder Agent jeden kennt und keinerlei Weisungs- oder Delegationstrukturen existieren. Der Vorteil besteht in der Flexibilität, denn alle Agenten können potentiell zur Aufgabenbewältigung beitragen. Dies ist gleichzeitig auch der Nachteil, denn für große Anzahlen von Agenten wird ein nicht unwesentlicher Anteil an Ressourcen dafür verwendet, die geeigneten Kommunikationspartner zu ermitteln. Das andere Ende des Spektrum stellt eine totale Bürokratie dar. In einer Bürokratie existieren Hierarchien, an denen sich auch die Weisungsmöglichkeiten orientieren. Bekanntschaft ist nur zwischen benachbarten Hierarchieebenen nötig, weitere Interaktionsbeziehungen sind nicht vorgesehen und somit in formaler Hinsicht auch ausgeschlossen. Die Kommunikationsstrukturen erleichtern das Auffinden der zuständigen Agenten, jedoch um den Preis, dass viele Bewältigungsmöglichkeiten von vornherein ausgeschlossen werden. Es ergeben sich also entgegensätzliche Forderungen an Flexibilität und Koordinierungsaufwand.

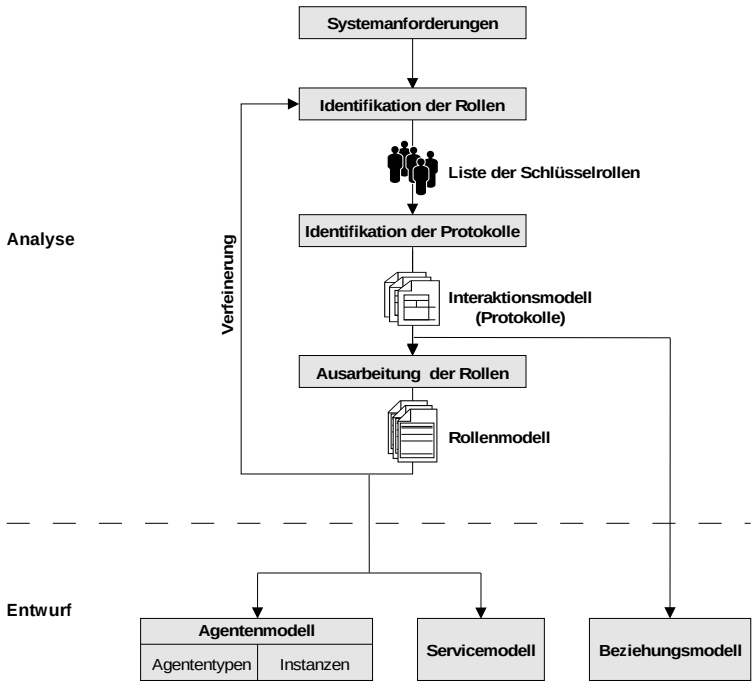


Abbildung 3.11: Der GAIA-Entwicklungsprozess (Darstellung nach Weiß und Jakob, 2004, S.48)

Diese Parameter – Typisierung, Interaktionsstruktur und Instantiierung – werden durch das *Organisationsdesign* festgelegt. Wir betrachten exemplarisch den GAIA-Entwicklungsprozess (vgl. Abbildung 3.11). In der Analysephase werden im ersten Schritt aus den Systemanforderungen die relevanten Rollen extrahiert und im zweiten Schritt die Interaktionen zwischen ihnen erhoben. Diese beiden Elemente werden in der Entwurfsphase genutzt, um einerseits die Agentenmodelle – inklusive der von ihnen definierten Dienste (Servicemodell) – und andererseits die Beziehungen (Beziehungsmodell) zwischen ihnen abzuleiten.

3.5 Soziale Theorien der Agentensysteme

Setzt man, wie in der Organisationsforschung lange Zeit üblich, eine Organisation mit ihren Formalstrukturen gleich, so gerät dabei aus dem Blickfeld, dass in Organisationen noch mehr Kräfte am Werk sind, als mit solch einer funktionalen Sichtweise wahrgenommen werden können. Um dies abzubilden wurde die Kategorie der informellen Strukturen und Gruppen eingeführt und mit ihnen u.a. auf die persönlichen Befindlichkeiten der Mitglieder geschaut (vgl. dazu auch die überblicksartige Darstellung in Kapitel 5.4)

In Organisationen vermischen sich in den Akteursbeziehungen informelle und formale Organisationsanteile. Als formale Strukturen gelten im allgemeinen die offiziellen, kodifizierten Teile der Organisation. Sie werden oft gleichgesetzt mit Regeln, Verfahren oder Vorschriften. Wohingegen informelle Strukturen meist

die offiziell nicht vorgesehenen oder sogar heimlichen und unerlaubten Praktiken der Organisation umschreiben.

3.5.1 Sozionik: Institutionen als Objekt sozialer Prozesse

Was durch eine Einordnung in die Kategorien formal/informell weitgehend unberücksichtigt bleibt, ist die Tatsache, dass so getrennt wird, „was in der Realität untrennbar und unentwirrbar verbunden ist“ (Friedberg, 1995, 144). Denn in Wirklichkeit existiert die Formalstruktur in Abhängigkeit von den Verhaltensweisen und Praktiken, die sie zu regeln versucht. Die formalen Strukturen erlangen nur in dem Maße Wirksamkeit, wie sie in die real stattfindenden Verhaltensweisen und Praktiken der Akteure aufgenommen werden. Formalstrukturen sind das Ergebnis von Regelsetzungen oder Verhandlungen der Organisationsmitglieder und drücken dieses in kodifizierter Form aus. Formale Vorschriften werden aber ständig von den Praktiken der Beteiligten geformt, indem jene versuchen, Zwänge zu umgehen und Situationen aus- und umzudeuten.

Soziologisch gesehen ist eine Organisation daher sowohl steuernder Kontext als auch von den Akteuren gestaltete Umwelt. Organisation sind Institutionen, d.h. soziale Regelkomplexe und als solche soziale Konstrukte.

Dieser Gedanke findet sich in ähnlicher Form auch in der VKI. Der auf Logik basierende Ansatz von Castelfranchi und Conte (1995a) befasst sich ebenfalls mit der wechselseitigen Konstitution. Ausgehend vom Individuum wird diskutiert, wie Konventionen oder Normen in der Handlungslogik des Akteurs zu verankern sind. Die duale Fragestellung, nämlich wie Normen aus den Handlungen entstehen, muss – wie die Autoren selbst feststellen – jedoch weitestgehend unbeantwortet bleiben, da die Autoren kein Theoriekonstrukt neben dem Akteur einführen (wollen), so dass sie das Konzept einer überindividuell etablierten Norm nicht im Modell verankern können.

Angesichts dieser Problematik spricht sich Castelfranchi (2000) dafür aus, in den Modellen sowohl den Agenten als auch die Systemprozesse als Systemelemente zu begreifen und deren Wechselwirkungen als Modellmechanismen.[5]

Wir können daher schließen, dass für die Modellierung einer wechselseitigen Beeinflussung soziale Strukturen ebenso wie Agenten im Modell zu repräsentieren sind. Diese Wechselseitigkeit ist uns bereits als Mikro-Makro-Dualität bekannt. Die Forderung kommt der Situation in Abbildung 3.4 gleich. Das Wechselspiel von Mikro- und Makro-Elementen muss Bestandteil des Systementwurfs sein. Dazu müssen diese beiden Elemente jeweils im Modell abgebildet werden. Wir werden auf diesen Punkt in Kapitel 8 erneut zurückkommen.

Das DFG-Schwerpunktprogramm *Sozionik* widmet sich genau der Integration dieser beiden Perspektiven sowie deren Wechselseitigkeit.

> „Eine der Aufgaben sozionischer Forschungsarbeiten besteht darin, Mikro-Makro-Zusammenhänge auf den unterschiedlichen Ebenen so-

[5] “[...] I claimed that only agent based social simulation joint with AI models of agents can eventually solve this problem by formally modelling and simulation *at the same time* the individual minds and behaviours, the ermegent collective action, structure or effect, and their feedback to shape minds and reproduce themselves.” (Castelfranchi, 2000, S.5)

> zialer Koordination derart zu rekonstruieren, dass damit die Grundlagen für große, fehlerfreundliche und rekursiv vernetzte Multiagentensysteme gelegt werden.“ (Sozionik, 1998)

Da Agentensysteme ihrer Natur nach soziale Systeme sind, ist es naheliegend die Mikro-Makro-Wechselwirkungen aus der Perspektive der Sozialwissenschaften zu untersuchen. Der Absatz der Sozionik ist es, die dortigen Konzeptionen von Sozialität sozialwissenschaftliche Theorien für das Design von Agentensystemen aufzugreifen. „Die moderne Gesellschaft bietet [...] ein reichhaltiges Reservoir an Vorbildern für die Modellierung von Multiagentensystemen. Dabei kann die Informatik von der Adaptivität, Robustheit, Skalierbarkeit und Reflexivität sozialer Systeme lernen und ihre Bauprinzipien in leistungsfähige Technologien umsetzen.“ (Sozionik, 1998)

Es verwundert nicht, dass in der Sozialwissenschaft ein ähnlicher Perspektivenpluralismus herrscht wie in der informatischen Theorie. So denkt Gesellschaftstheorie Soziales primär von den Sozialstrukturen her, Akteurstheorie von den Akteuren und soziologische Netzwerktheorie von den Interaktionen. Prinzipiell kann die Mikro-Makro-Wechselwirkung aus einer speziellen Perspektive – Agent, Gruppe, Organisation oder Sozialität – verstanden werden. Eine solche einseitige Fokussierung ist aber bzgl. des Beschreibungsaufwandes bestenfalls unökonomisch – praktisch gesehen tendiert eine Fokussierung jedoch dazu, unvollständig zu bleiben, da die wechselseitige Konstruktion der Elemente verschiedener Perspektiven leicht aus dem Blickfeld gerät. Wir stellen somit die Wechselwirkung in den Vordergrund unserer Analysen, womit auch gleichzeitig klar ist, dass sowohl Mikro- als auch Makro-Elemente Theorieobjekte sein müssen.

Speziell die Ergebnisse in Bezug auf die konstituierenden Parameter der Mikro-Makro-Prozesse besitzen einen Bezug zur Skalierungsproblematik in Agentensystemen. Unsere Aufgabe ist es, die gefundenen Mechanismen zu qualitativen Erweiterung der MAS/VKI-Konzepte – wie Kontrolle, Verhandlung, Kooperation etc. – zu nutzen. Verwandte Ansätze finden sich im Bereich der Adaption von Organisationsformen bei Turner und Jennings (2001), Panzarasa und Jennings (2001), Glaser und Morignot (1997), Kirn und Gasser (1998) und Schillo (2003). Wenn wir soziale Strukturen im Multiagentensystem repräsentieren, dann sind wir auch in der Lage, die Selbstorganisation auf Ebene des Systems zu beschreiben.

3.5.2 Reflexivität in der agentenorientierten Softwareentwicklung

Die Betrachtung des GAIA-Entwicklungsprozesses im vorangegangenen Abschnitt lässt darauf schließen, dass die vom ihm generierten Agentensysteme nicht darauf ausgelegt sind, sich an dynamische Systemanforderungen anzupassen. Bei Veränderung der Anforderungen kommt es zu einer Fortentwicklung des Systems. Design- und Implementationsphasen sind daher zyklisch verschränkt (vgl. Abbildung 3.12). Es ergibt sich ein iteratives Entwicklungsmodell, wie beispielsweise das des evolutionären Prototyping (Floyd, 1993).

Für iterative Entwicklungsmodelle ist es wichtig, dass die *konzeptionelle Lücke* zwischen der Design- und der Implementationssprache möglichst klein ist, da

sich dann die Abbildbarkeit von Design und Implementation besser (d.h. korrekt und mit geringem Aufwand) realisieren lässt. Idealerweise sind die Modellbausteine der Designsprache bereits Bausteine der Implementationssprache (engl. *first order objects*). Fallen die Konzepte beider Darstellungssysteme zusammen, so ist es naheliegend, nicht mehr den Entwickler allein die Anpassungen an sich verändernde Systemanforderungen vornehmen zu lassen, sondern das System selbst. Die Fortentwicklung geschieht durch das System selbst (vgl. Abbildung 3.13). Diese Idee findet derzeit industriellen Anklang u.a. im Bereich des *Autonomous Computing* von IBM (Kephart und Chess, 2003).

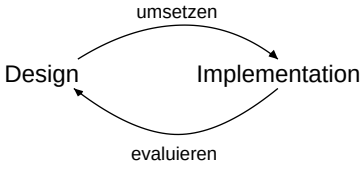


Abbildung 3.12: Iterative Entwicklung

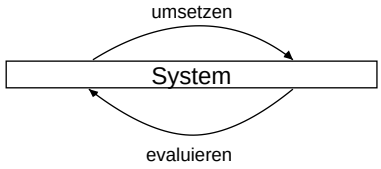


Abbildung 3.13: Selbstorganisation

Für uns ergibt sich daher im folgenden die Frage nach der Flexibilität und der Dynamik von Organisationsstrukturen. Organisationsstrukturen sind flexibel, wenn sie sich vom System selbst modifizieren lassen. Dabei stellt sich noch die Frage, wie groß der Aufwand ist, sich an veränderliche Umwelten anzupassen.

Ist von Interesse, dass nicht nur der Entwickler sie modifizieren kann, sondern dass Veränderungen auch als emergentes Produkt der Agenteninteraktionen entstehen können, dann ist es notwendig, die Strukturen *explizit* im Modell zu repräsentieren. Organisationsstrukturen, die der Veränderung der Organisation dienen, bezeichnen wir als Meta-Strukturen. Mit ihnen nimmt die Organisation auf sich selbst Bezug.

Es ist festzuhalten, dass die meisten Entwicklungsmodelle Organisationsstrukturen zwar als Analyse-, nicht aber als Implementationskategorie führen, d.h. dass in der Modellierungssprache keine Konstrukte existieren, die Organisationsstrukturen direkt auszudrücken.[6] Beispiele für solche Entwicklungsmodelle sind GAIA (Zambonelli u. a., 2003) und MaSE (DeLoach u. a., 2001). Die Organisationsstrukturen dieser Ansätze sind also keine *first order objects*, sie werden stattdessen auf andere Elemente abgebildet. Ansätze, bei denen Organisationsstrukturen sowohl Gegenstand der Analyse als auch der Implementation sind, finden sich bei MOISE (Boissier u. a., 2000), Taems (Nagendra u. a., 1996), OMNI (Dignum u. a., 2004) und Tropos (Bresciani u. a., 2004).

Es ergeben sich also auf zwei Ebenen Wechselwirkungsbeziehungen: eine im Entwicklungsprozess und eine in Agentensystem. Abbildung 3.14 illustriert die

[6] Schwarmsysteme sind ein Beispiel eines Ansatzes, bei dem Organisationsstrukturen weder in der Analyse- noch in der Implementationsphase berücksichtigt werden. Ein weiterer Grenzfall sind Systeme, die Organisationsstrukturen nur ad-hoc aufbauen, beispielsweise im Rahmen des Kontraktnetzprotokolls.

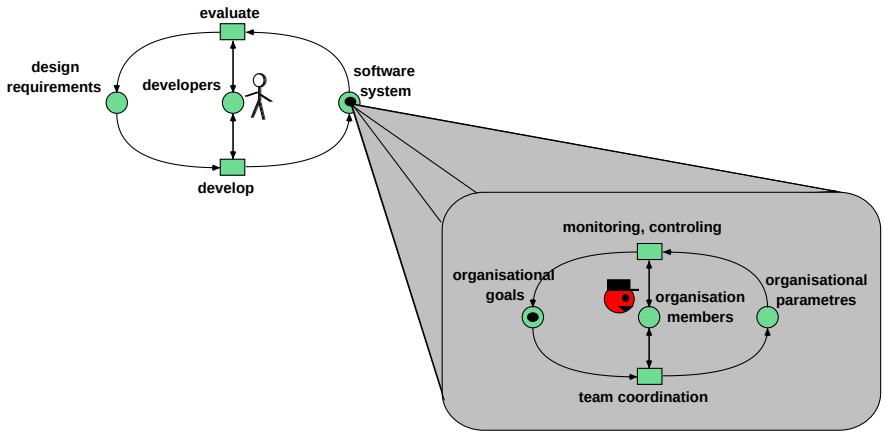


Abbildung 3.14: Reflexivität der agentenorientierten Softwareentwicklung

Reflexivität der agentenorientierten Softwareentwicklung, indem es im Modell der Softwareentwicklung aus Abbildung 3.10 berücksichtigt, dass das zu entwickelnde Softwaresystem eine Multiagentensystemorganisation wie in Abbildung 3.6 ist. Es zeigt sich hier die Strukturgleichheit von Entwicklung und Entwickelten.

Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel betrachteten Konzepte der Multiagentensysteme existieren in interaktionsorientierter und in struktureller Sichtweise. Hierbei geht es insbesondere um den Aspekt der Koordinierung in Agentensystemen. Wir haben festgestellt, dass Multiagentensysteme auf verschiedenen Abstraktionsebenen betrachtet werden können. Wir können die Perspektive der Agenten und ihrer Handlungswahl einnehmen. Abstraktere Perspektiven betrachten Agentensysteme dagegen auf Ebene der Interaktion bzw. auf der Ebene des Teams. Die abstrakteste Perspektive ist wohl die, ein Agentensystem als Organisationsform zu betrachten.

Jede Perspektive liefert ihren spezifischen Beitrag zur Flexibilität der Agentensysteme. Koordination in Form von Kooperation und Konkurrenz stellt einen Mechanismus auf der Ebene kleinerer Agentengruppen dar, um durch Verhandlung und verteiltes Problemlösen Aufgaben intelligent und flexibel zu bearbeiten. Daneben haben wir mit Normen und Institutionen überindividuelle Mechanismen kennengelernt, die sich auf die Handlungswahl der Agenten auswirken, ohne selbst direkt Bestandteil des Agenten zu sein. Offensichtlichste Institutionsform im Kontext der Multiagentensysteme sind Organisationen, die insbesondere für die agentenorientierte Softwareentwicklung als eine von den Agenten unabhängige Vorstrukturierung des Systems dienen.

Als besondere Herausforderung haben wir die Skalierungsproblematik der Verteilten Künstlichen Intelligenz kennengelernt, d.h. die Aufgabe, auf Basis lokaler Programmierung effektiv und effizient global kohärente Prozesse zu erschaffen.

In diesem Zusammenhang begegneten wir der Wechselseitigkeit von Handlungen und Strukturen: Zum einen bedingen die Organisationsstrukturen des Agentensystems die Handlungen der Agenten, indem sie jene rahmen und einschränken. Aber zum anderen sind es auch die Handlungen, die bestehende Strukturen verändern und sogar neue hervorbringen.

Die Sozionik studiert genau diese Wechselwirkung von Mikro- und Makro-Elementen in Multiagentensystemen, d.h. die Abhängigkeiten von Prozessen, bei denen zum einen die Handlunsgwahl des Akteurs eine unabhängige Variable ist, zum anderen aber auch die Institutionen eine Rolle spielen. Die Herausforderung liegt hierbei in der reflexiven Verschränkung beider Effekte.

Betrachten wir nun in den folgenden Abschnitten, wie diese Verschränkung von sozialen Theorien beschrieben wird und wie sich die beschriebenen Mechanismen auf Multiagentensysteme übertragen lassen.

Teil II

ASKO: Modellierung sozialer Akteure

„Eine Doktrin ist keine Medizinerin."

Sportfreunde Stiller. „Alles Roger"

Überblick

In diesem Abschnitt beleuchten wir Agenten in ihrer Eigenschaft als soziale Akteure. Um überhaupt begreifen zu können, was Sozialität ausmacht, haben wir im Rahmen des ASKO-Projektes (v. Lüde u. a., 2003) damit begonnen, soziologische Theorie zu modellieren, um sie so für den informatischen Kontext fruchtbar zu machen.

Wir haben uns für Petrinetze als Modellierungssprache entschieden, um die vielfältigen Konzepte, Beziehungen und Dynamiken der hier behandelten Sozialtheorien abbilden zu können. Die Vorzüge der Petrinetze als Modellierungstechnik gerade für den sozionischen Kontext erläutern wir in Kapitel 4. Hier beschreiben wir das Wesen vermittelnder Netze als sozionisch fundierte Darstellungstechnik.

In Kapitel 5 präsentieren wir unsere Modellierung der Grundlinien soziologischer Theoriebildung, untergliedert in die individualistische, die intersubjektive und die strukturelle Perspektive. Für den Individualismus modellieren wir Akteursmodelle, darunter speziell den Homo Sociologicus und den Homo Oeconomicus. Mit den Strukturdynamiken modellieren wir den intersubjektiven Bezug der Akteure in typischen Konstellationen, wie der wechselseitiger Beobachtung, Beeinflussung oder Verhandlung. Und schließlich modellieren wir Organisationstheorien als Paradebeispiel strukturierter Handlungsfelder. Als konkrete Theorie wurde hier der strategische Ansatz von Crozier und Friedberg gewählt.

Als zentrale Herausforderung stellte sich die geeignete Modellierung der Mikro/Makro-Wechselwirkungen dar, die wir in Kapitel 6 betrachten. Für die Modellierung wurden Theorien herangezogen, die sich explizit mit der rekursiven Verschränkung von Handlung und Struktur beschäftigen. Wir haben die Wechselwirkung am Beispiel dreier Theorien untersucht: Den Anfang macht der Monopolmechanismus von Norbert Elias mit seiner Theorie der Co-Evolution von Kontrolle und Internalisierung. Wir modellieren den Symbolkampf in Pierre Bourdieus Habitus/Feld-Theorie, die Gesellschaftsstruktur als Produkt habituell gesteuerter sozialer Auseinandersetzungen um Kapitalien begreift. Und drittens betrachten wir die Theorie zur Konstruktion sozialer Ordnung nach Heinrich Popitz, bei der Verhaltensregelmäßigkeiten und die wechselseitige Orientierung an ihnen als Investition ordnungsbewusster Akteure zum Aufbau und Stabilisierung sozialer Strukturen führt.

Das Kapitel schließt mit einer Analyse auf Gemeinsamkeiten. Die gefundenen Übereinstimmungen führen zu einem sozionischen Mehrebenenmodell der Mikro/Makro-Verbindung, das uns als analytischer Rahmen für die Betrachtung der konkreten Theorien dient.

4 Methodologische Anmerkungen

Ziel des ASKO-Projektes ist unter anderem die Entwicklung der sozionisch adäquaten Multiagentensystemarchitektur SONAR auf der Basis einer *Theorie sozialer Selbstorganisation* (TSSO). Die Struktur der Theorie dient der Informatik als Designmetapher für die Architektur des Multiagentensystems.

Die Modellierungserfahrungen innerhalb unseres Projektes zeigen, dass eine textuelrepräsentierte soziologische Theorie (oder auch eine speziell sozionische) auf der einen Seite und eine sozionische Multiagentensystemarchitektur auf der anderen Seite als Beschreibungstechnik zu unterschiedlich sind, als dass sie vergleichbar wären. Um den Transfer der soziologischen Theorie in eine sozionische Architektur zu ermöglichen, ist daher eine Beschreibungstechnik notwendig, die zwischen Text und Modell vermitteln hilft.

Die Ebene, die diese Lücke schließt, ist die Ebene der *vermittelnden Netze*. Es handelt sich dabei um eine Form der Petrinetze, die es zum einen ermöglicht, soziologische Sachverhalte zu visualisieren, die zum anderen aber dem Petrinetzformalismus von SONAR so nahe steht, dass ein Vergleich zwischen den vermittelnden Netzen und den Agentennetzen möglich ist (vgl. Abb. 4.1). Auf diese Art und Weise ist es gewährleistet, dass beide Projektpartner – Soziologie und Informatik – zu der Entwicklung von SONAR beitragen können.

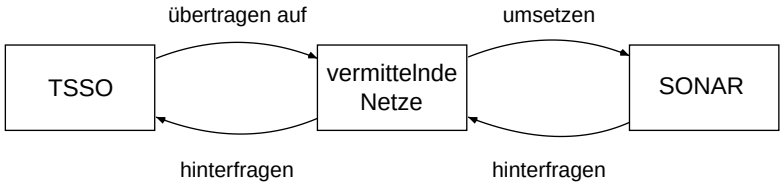


Abbildung 4.1: Einsatz vermittelnder Netze

Die gemeinsame Beschreibung eines solchen sozionischen Modells entwickelt sich aus der Iteration einer zyklischen Verschränkung von textuellen Beschreibungen und formalen Darstellungen mittels Petrinetzen. Dadurch münden Modellentwicklung und -modifkation in der einen Disziplin direkt in die Arbeit der jeweils anderen. Dies bildet die Grundlage einer weiteren Überarbeitung des Modells. Wir erhalten somit einen sich mehrfach wiederholenden Zyklus.[1] Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in der engen Verzahnung von soziologischer Theoriearbeit und informatischer Modellierung. Durch die ständige interdisziplinäre Evaluierung, die sich zwangsläufig während des Modellierungsprozess ergibt, entsteht eine gemeinsames Bild des Forschungsgegenstandes.

[1] Diese kreislaufartige Entwurfsmethode ist in der Informatik unter dem Schlagwort „evolutionäres, partizipatives Prototyping“ bekannt (s. dazu Floyd, 1993).

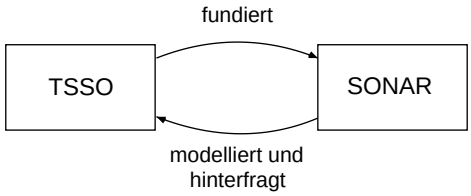


Abbildung 4.2: Sozionische Arbeit

Die im Projekt entwickelten Petrinetzmodelle können durch soziologische Einsichten kritisiert werden und tragen so zu einem Erkenntnisgewinn für beide Seiten bei: Die Informatik gelangt in dieser zyklischen Herangehensweise zu einer ständigen Verfeinerung der sozionischen Fundierung der Multiagentensystemarchitektur. Die Soziologie profitiert von dieser engen Wechselwirkung, indem durch sie Inkonsistenzen, Unklarheiten und „blinde Flecken“ soziologischer Theorien allein schon durch den Versuch ihrer partiellen Formalisierung aufgedeckt und mittelfristig „richtige“ Aussagen experimentell validiert werden (vgl. Abb. 4.2).

Unsere Beschreibungstechnik stützt sich dabei insbesondere auf die Petrinetztheorie. Die Verwendung von Petrinetzen bietet zahlreiche Vorteile: Petrinetze sind (a) anschaulich, basieren (b) auf der fundamentalen Dualität von aktiven und passiven Elementen, besitzen (c) sowohl ein Struktur- als auch ein Prozesskonzept, und sind (d) formal analysierbar.

Die Modelle erhalten daher – dies ist der zentrale Vorteil aus der Sicht der Informatik – durch Rückkopplung mit den Soziologen im Modellierungsprozess mit höherer Wahrscheinlichkeit die Essenz des zu Modellierenden.

Die Modellierungseigenschaften der Petrinetze werden wir im folgenden im Detail darstellen und aufzeigen, wie diese Elemente nutzbringend für sozionische Arbeit eingesetzt werden können.

4.1 Zum Wesen der Theoriemodellierung

Die Ergebnisse der Theorierekonstruktion mit Hilfe vermittelnder Petrinetzmodelle sind für die Informatik, die Soziologie und die Sozionik gleichermaßen bedeutend.

Der Gewinn für die Informatik besteht in der Integration sozialwissenschaftlich fundierter Strukturen in Multiagentensysteme.[2] Um die Konzepte der Sozialwissenschaft jedoch nutzen zu können, ist es notwendig, ihren Modellcharakter derart aufzubereiten, dass sie anschlussfähig innerhalb der Informatik kommuniziert werden können. Agentenorientierte Ansätze, die sich aus der Sozialsimulation entwickeln, sind jedoch weit davon entfernt, die von der Soziologie

[2]Der Antragstext zum DFGSchwerpunktprogramm Sozionik erklärt hierzu: „Die moderne Gesellschaft bietet [...] ein reichhaltiges Reservoir an Vorbildern für die Modellierung von Multiagentensystemen. Dabei kann die Informatik von der Adaptivität, Robustheit, Skalierbarkeit und Reflexivität sozialer Systeme lernen und ihre Bauprinzipien in leistungsfähige Technologien umsetzen.“ (Sozionik, 1998)

beschriebene Dialektik der Strukturebene angemessen abzubilden (vgl. Castelfranchi, 2000). Als wesentliche Problematik erweist sich die Tendenz, sich einseitig auf die Mikroperspektive sozialer Systeme festzulegen, da sich diese in direkter Weise auf das Konzept des „Agenten“ übertragen lässt, während dies für die Makro-Perspektive nicht unmittelbar möglich ist.

Der Gewinn für die Soziologie besteht in der Erweiterung des Methodenschatzes. Konkret hat dies zur Folge, dass Inkonsistenzen, soziologischer Theorien durch den Versuch ihrer Modellierung aufgedeckt werden. Eine solche Methodenerweiterung ist jedoch nicht beliebig möglich, da jede Technik ihre eigenen Grundlagen besitzt. Petrinetze bieten durch ihre intuitiv verständliche Semantik und durch ihre graphische Darstellungsform optimale Voraussetzungen für die Aufnahme in den formalen Methodenapparat der Soziologie.[3] Hinzu kommt, dass Petrinetze nicht nur in ihrer statischen Struktur präsentiert werden, sondern dass auch das Markenspiel, also der Ablauf von Prozessen, von Computerprogrammen animiert wird. Die Methode zur Theorie-Rekonstruktion mit Hilfe von Petrinetzen fügt sich direkt in den Katalog der sozionischen Forschungsaufgaben ein.[4]

Die erarbeiteten Modelle eignen sich in hohem Maße, soziologische Theorieaussagen innerhalb kürzester Zeit für fachfremde Personen fruchtbar zu machen. Dies konnte auch im Rahmen der universitären Lehre bestätigt werden. So wurden die Modelle in Vorlesungen und Seminaren der Soziologie verwendet, um Theoriezusammenhänge zu visualisieren. Hierbei zeigte sich, dass die Teilnehmer in der Lage waren, die Theoriezusammenhänge zu erkennen und hierauf aufbauend die Stärken und Schwächen der Theorien eigenständig zu diskutieren.

Der Gewinn für die Sozionik ist auf zwei Ebenen erkennbar: Auf der Ebene der Sozialtheorien und auf der Ebene der Meta-Theorie von Sozialtheorien. Metatheoretisch beschäftigt sich die Sozionik mit den Erklärungswerkzeugen der Soziologie. Da jede Sozialtheorie nicht die soziale Welt selbst ist, sondern nur ein Modell von ihr, ist es unbedingt notwendig, die Modellelemente eingehend zu betrachten.[5] Diese Zielsetzung der Sozionik erwies sich für die Modellierungsarbeit nicht nur als Pflichtaufgabe, sondern ergab sich automatisch als Teil der wechselseitig bezogenen Projektarbeit. Wie von softwaretechnischen Projekten bekannt, ergab sich während der Modellierungsarbeit ein Austausch über die Fragestellungen und die Methoden der jeweils anderen Disziplin. Weiterhin war

[3] Es ist darauf hinzuweisen, dass die Modellentwicklung ein hohes Maß an Erfahrung und Modellierungskompetenz erfordert, wohingegen das Nachvollziehen und Diskutieren der Modelle dies nicht erfordert.

[4] „Umgekehrt kann die Soziologie von der Informatik profitieren, indem sie die Multiagententechnik als Simulationswerkzeug zur Überprüfung und Ausarbeitung ihrer eigenen Begriffe, Modelle und Theorien nutzt. Hier eröffnen sich neuartige Möglichkeiten, um dynamische Wechselwirkungen zwischen Mikrophänomenen (soziales Handeln) und Makrophänomenen (gesellschaftliche Struktur) nachzubilden und experimentell durchzuspielen.“ (Sozionik, 1998)

[5] „Es ist deshalb erforderlich, dass sich Informatiker und Soziologen über die Grundbegriffe künstlicher Sozialität und die darin enthaltenen theoretischen Annahmen austauschen. [...] Ein Konzept- oder Methodentransfer ist ausdrücklich anzustreben. Ziel des sozionischen Programms ist es, derartige Austauschprozesse zu begünstigen.“ (Sozionik, 1998)

es für die Zusammenarbeit zwingend, sich ein gemeinsames Modell des Sozialen zu erarbeiten, das die Menge der Konzepte mit ihren Bezügen ordnete und in eine Abstraktionshierarchie einbettete.

Nahezu automatisch rückte die Ausarbeitung des Mikro-Makro-Zusammenhanges und sein Bezug zu Multiagentensystemen in den Mittelpunkt unserer Analysen.[6] Eine Fokussierung auf den Mikro-Makro-Zusammenhang ist auch für die Analyse der Skalierungsproblematik im Rahmen von Agentensystemen elementarer Bestandteil, da sich zentrale Modellierungsdetails an der Schnittstelle von Mikro- und Makroprozessen befinden. Hierbei erweist sich die Verwendung von „Netzen in Netzen“ als besonders hilfreich, da beide Ebenen analytisch klar zu trennen sind, so dass ihre Übergänge umso deutlicher zum Ausdruck kommen.

4.2 Vermittelnde Netze als sozionisch fundierte Darstellungstechnik

Um die Beziehungen soziologischer Theorien in einer textnahen Form darstellen zu können, bedienen wir uns in vermittelnden Netzen verschiedener Modellierungsmuster, die sich in den Kanten ausdrücken. Im Zentrum steht eine Aktivität, die als Transition modelliert wird, sowie die Objekte die im im Kontext der Aktivität relevant sind. Aktivitäten werden als Transition modelliert, die Objekte als Stellen. Die Muster unterscheiden die Objekte nach der Art ihres Mitwirkens (vgl. dazu die in Abbildung 4.3 dargestellen Elemente):

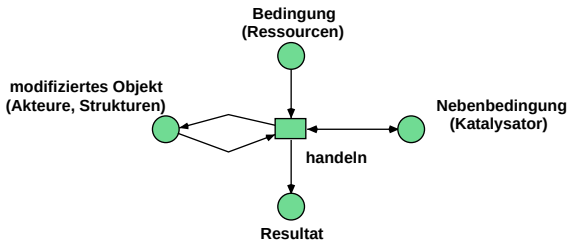


Abbildung 4.3: Allgemeines vermittelndes Netz

- Modifizierte Objekte: Dies können Akteure, Strukturen usw. sein. Prozesshafte Objekte sind zustandsbehaftete Einheiten. Um dies darstellen zu können, verbinden wir den zugehörigen Platz mit Doppelkanten, was sowohl den Erhalt des Objektes an sich andeutet als auch seine mögliche Veränderung im Laufe eines Prozesses.

- Bedingungen: Damit sind sowohl Ressourcen als auch allgemeine Konzepte, wie beispielsweise Emotionen, gemeint. Ressourcen werden durch das

[6] Der Mikro-Makro-Zusammenhang ist aber zentraler Gegenstand der Sozionik: „Eine der Aufgaben sozionischer Forschungsarbeiten besteht darin, Mikro-Makro-Zusammenhänge auf den unterschiedlichen Ebenen sozialer Koordination derart zu rekonstruieren, dass damit die Grundlagen für große, fehlerfreundliche und rekursiv vernetzte Multiagentensysteme gelegt werden.“ (Sozionik, 1998)

Schalten einer Transition „verbraucht“. Sie werden mit einfachen, einlaufenden Kanten notiert.

- Resultate: Ähnlich zu den Bedingungen sind auch hier Ressourcen und Konzepte gemeint: so kann beispielsweise „soziale Stabilität“ ein Resultat sein. Resultate werden „erzeugt“ und mit einfachen, auslaufenden Kanten notiert.

- Nebenbedingungen: Damit sind Objekte gemeint, die als Katalysator fungieren. Sie verändern sich nicht, werden also auch nicht verbraucht, sie sind aber für die Aktivität unbedingt erforderlich.

Die Rolle eines Objektes ist nur lokal durch ein Muster festgelegt. So kann ein Objekt, das für eine Tätigkeit als Resultat modelliert wird, für eine andere eine Bedingung darstellen.

Eine weitere Modellierungsdimension unterscheidet zwischen Stellen, die kausale Beziehungen betonen, von solchen, die den Ressourcencharakter betonen.

Petrinetze erlauben es, kausale Abhängigkeiten darzustellen. Charakterisiert man beispielsweise eine Handlung durch die Handlungsbedingungen und die Handlungswirkungen, so kann dies unmittelbar als Petrinetz dargestellt werden (vgl. dazu Abb. 4.4).

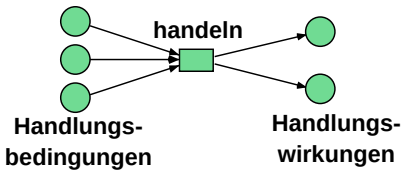


Abbildung 4.4: Handlung

Der rein kausale Aspekt betrifft die statischen Beziehungen eines Netzes. Die Dynamik einer Situation wird durch die Markierung eines Netzes festgelegt. Für einfache Petrinetze bedeutet ein markierter Platz, dass die durch den Platz bezeichnete Bedingung gilt. Ein unmarkierter Platz bedeutet, dass die Bedingung nicht gilt. Eine Situation, in der nicht alle notwendigen Handlungsbedingungen erfüllt sind, ist in Abbildung 4.5 dargestellt: Hier sind nur zwei der drei Vorbedingungen erfüllt. Die Transition handeln ist daher *nicht* aktiviert, man sagt auch: „Die Transition kann nicht schalten“.

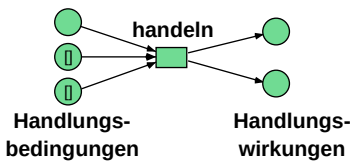


Abbildung 4.5: Nicht mögliche Handlung

Anders dagegen die Situation in Abbildung 4.6: dort gelten alle Bedingungen, die Transition ist aktiviert. Das Ereignis handeln *kann* eintreten, da die Transition aktiviert ist – es muss aber nicht. Wenn es eintritt, gelten nach dem Eintritt die Nachbedingungen, in diesem Fall also die Handlungswirkungen (vgl. die Veränderung in Abb. 4.6).

Abbildung 4.6: Mögliche Handlung zusammen mit dem eingetreten Ereignis

Plätze können nicht nur als Bedingungen (die nur erfüllt oder nicht erfüllt sein können) eingesetzt werden, sondern auch als Darstellung von Ressourcen. In Petrinetzen können Plätze mehrfach markiert werden, um das mehrfache Vorhandensein von Ressourcen zu beschreiben. Ein Ereignis kann auch mehrere Ressourcen benötigen. So benötigt das Netz in Abbildung 4.7 die Ressourcen Zeit und Geld, dabei stehen 6 Zeit- und 8 Geldeinheiten zur Verfügung. Zum Schalten der Transition entscheiden werden 2 Zeit- und 5 Geldeinheiten benötigt und eine Entscheidung wird produziert. Das Schalten bewirkt, dass die entsprechenden Ressourcen genutzt werden und die abgebildete Situation entsteht.

Abbildung 4.7: Ressourcen

4.2.1 Abstraktionsmechanismen: Verfeinerung und Faltung

Abstraktion ist das zentrale Konzept, um generalisierte Aussagen zu erhalten. Dazu existieren zwei zentrale Konzepte: zum einen die *Vergröberung*, die Differenzierungen ausblendet, zum anderen die *Faltung*, die Gleichartiges zusammenfasst.

Verfeinerung und Vergröberung

Betrachten wir das Beispiel der wechselseitigen Konstitution von Handeln und Strukturen. Soziales Handeln wird – nicht ausschließlich, aber doch wesentlich – durch soziale Strukturen geprägt. Doch auch die andere Richtung ist zu denken: Strukturen werden – unter Umständen unintendiert – durch Handeln hervorgebracht. Dies ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Betrachten wir nun *verfeinernd*, wie dies konkreter zu fassen ist, hier am Beispiel der Stelle Sozialstruktur. Schimank folgend beziehen sich die Handlungseffekte auf drei Arten von Strukturen, nämlich auf Deutungs-, Erwartungs-

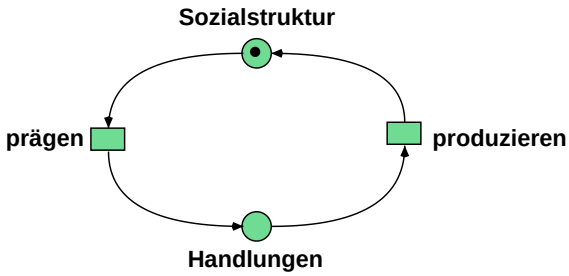


Abbildung 4.8: Wechselseitige Konstitution

und Konstellationsstrukturen. Diese Verfeinerung des Platzes Sozialstrukturen zu den Plätzen Deutungsstrukturen, Erwartungsstrukturen und Konstellationsstrukturen ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Eine solche Verfeinerung heißt *Platzverfeinerung*. Die Verfeinerung einer Transition erfolgt ganz analog.

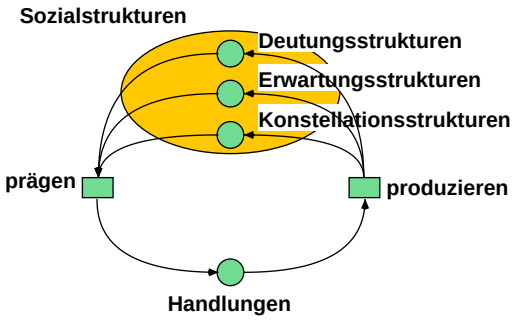


Abbildung 4.9: Verfeinerung der Sozialstruktur

Faltung

Eine *Faltung* fasst gleichartige Aktionen zusammen. Betrachten wir als Beispiel die Handlungswahl: Die Logik der Selektion wird von dem Nebeneinander der Akteursmodelle geleitet, die auf teilweise sehr unterschiedliche Elemente von Strukturen rekurrieren, um die Verknüpfung zur Logik der Situation herzustellen. Eine Modellierung dieser Darstellung ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Jedes Handeln (hier dargestellt durch die evtl. unendliche Zahl an Transitionen handeln$_n$) bezieht sich auf die Menge aller Struktur- und Situationselemente, dargestellt jeweils durch die gleichnamigen Plätze. Man erkennt beispielsweise, dass die Situation den Bezug zu Strukturelementen maßgeblich bestimmt: so unterscheiden sich handeln 1 und handeln 2 nur geringfügig bezüglich der Strukturelemente, nämlich im Strukturelement 1. Dieser Unterschied ist durch die Situation beschrieben: in diesem Fall ist das Strukturelement 1 in Situation 1 relevant, für Situation 2 jedoch nicht.

Obgleich sich die einzelnen Handlungen handeln$_n$ im Detail unterscheiden, so sind sie doch Ausprägungen des gleichen strukturellen Phänomens: Struktur-

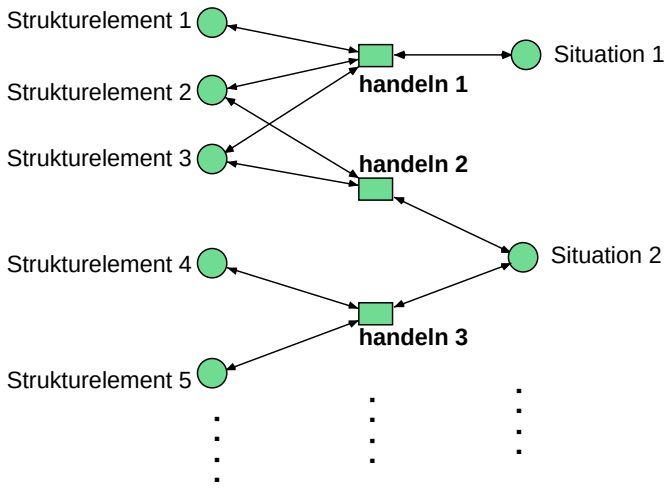


Abbildung 4.10: Verknüpfung von Strukturelementen durch die Situation

elemente und Situation zusammen sind nämlich im Konzept des Akteurmodells gebündelt. Akteurmodelle leiten die Handlungswahl an. In unserem Beispiel erklärt das Akteursmodell den Unterschied zwischen handeln 1 und handeln 2.

Diese Gleichartigkeit bzw. die Gleichsetzung wird durch eine *Faltung* formalisiert, die Gleichartiges zusammenfasst. Das Ergebnis der Faltung ist für unser Beispiel in Abbildung 4.11 dargestellt. Durch die Faltung entsteht ein gefärbtes Netz, was man daran erkennen kann, dass an den Kanten Variablenbezeichner stehen (hier: se für „Strukturelement“ und sit für „Situation“). Diese Variablen stellen den Bezug zu den jeweiligen Plätzen des zugrundeliegenden Netzes aus Abbildung 4.10 her.

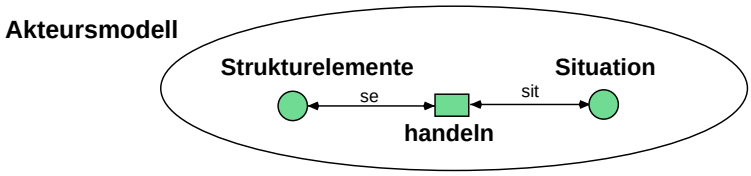


Abbildung 4.11: Akteursmodell als Faltung von Abb. 4.10

4.2.2 Prozesse von Petrinetzen sind Petrinetze

Ein Ablauf (auch: Schaltfolge) wird in der Petrinetztheorie vom Prozess unterschieden (siehe dazu Best und Fernández, 1988). Während ein Ablauf sich auf die zeitlichen Aspekte bezieht, beschreibt ein *Prozess* die kausalen Abhängigkeiten. Nicht jede zeitliche Abhängigkeit ist auch eine kausale, umgekehrt jedoch schon. Ein Ablauf könnte beschreiben, dass die drei Ereignisse e_1, e_2 und e_3 einander *zeitlich* folgen, so wie in Abbildung 4.12 angedeutet.

Es existieren aber sehr viele Prozesse, die diesen Ablauf ermöglichen, denn

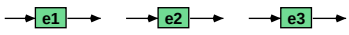


Abbildung 4.12: Ein Ablauf

die zeitliche Abfolge sagt nichts über die die dem Ablauf zugrundeliegenden kausalen Beziehungen aus. Diese Beziehungen werden nur im Prozess dargestellt. Die Abbildung 4.13 zeigt verschiedene Beispiele möglicher Prozesse, die alle den zeitlichen Ablauf $e_1e_2e_3$ erlauben.

Der erste Prozess erlaubt nur den Ablauf $e_1e_2e_3$, während der mittlere zusätzlich noch $e_1e_3e_2$ erlaubt, da zwischen den beiden Ereignisse e_2 und e_3 keine kausalen Beziehungen bestehen. Der rechte Prozess besitzt keinerlei kausalen Beziehungen, so dass alle Permutation von e_1, e_2 und e_3 als zeitliche Folg möglich sind.

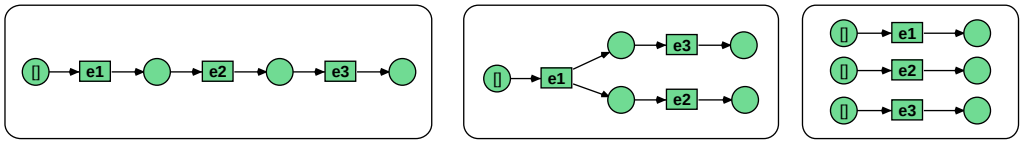


Abbildung 4.13: Mögliche Prozesse

Petrinetze erlauben es, einen Bezug von Prozessen und seinen strukturell gleichen Teilen herzustellen. Betrachte das Beispiel in Abbildung 4.14, das den Prozess einer einfachen Abarbeitungsfolge beschreibt: Der Akteur A bearbeitet dabei jeweils die Aufgaben 1 bis 5. Der Prozess beschreibt durch jede Transition, dass der Akteur A in der Bearbeitung involviert wird, dargestellt durch den Platz im Vorbereich, der den Akteur vor der Bearbeitung beschreibt, und durch den jeweiligen Platz im Nachbereich, der ihn im Anschluss an die Handlung beschreibt.

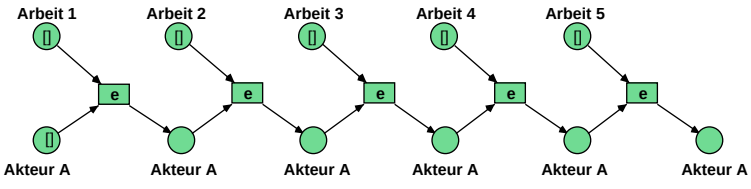


Abbildung 4.14: Prozess

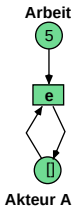


Abbildung 4.15: Struktur

Eine Zusammenfassung des Prozesses aus Abbildung 4.14 ist einfach anzugeben, da im Prozess eine Struktur fünfmal in identischer Art und Weise vorliegt. Diese Struktur der Bearbeitung kann durch eine *Faltung* zu einem Netz, der Prozessfaltung, zusammengefasst werden. Die Faltung ist in Abbildung 4.15 dargestellt. In diesem Fall erscheint nur eine Faltung des Prozesses naheliegend, im allgemeinen besitzt ein Prozess aber mehr als eine.

Der Prozess aus Abbildung 4.14 und die Faltung in Abbildung 4.15 stehen aber nicht nur durch die Faltung zueinander in Beziehung. Für dieses Beispiel gilt umgekehrt auch, dass alle *Abläufe* des Netzes aus Abbildung 4.15 Anfangsstücken des Prozesses aus Abbildung 4.14 entsprechen.

Im allgemeinen gilt, dass die Menge aller Prozesse sich aus dem Netz konstruieren lässt und umgekehrt, dass aus der Menge aller Prozesse sich das Netz falten lässt:

$$\text{Prozesse} \quad \underset{\text{Abläufe}}{\overset{\text{Faltung}}{\rightleftarrows}} \quad \text{Netz}$$

Man kann diese Betrachtungsweise mit dem Begriffspaar „Deduktion/Induktion“ der Soziologie vergleichen: Dort besteht ebenfalls der Bezug von Empirie, die Prozesse betrachtet, zu der zugrundeliegenden Struktur, die durch Theorien formuliert wird. Für uns sind insbesondere soziale, sich selbststabilisierende und reproduzierende Prozesse von Interesse.

Damit beenden wir die methodologische Anmerkungen zum Wesen der Theoriemodellierung und verwenden vermittelnde Netze in den folgenden Kapitel zu Darstellung sozialer Prozesse und ihrer Strukturen. Die folgenden Abschnitte geben die formalen Definitionen der bislang eingeführten Konzepte wieder.

4.3 Nebenläufigkeit und Petrinetze

Nebenläufigkeit ist das zentrale Konzept der Petrinetztheorie. Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass Ereignisse in Systemen keinerlei kausale Beziehung aufweisen. Nebenläufigkeit beschreibt die kausale Unabhängigkeit von Aktionen.

Die Aktivierung einer Transition ist unabhängig von Zuständen und Aktionen, die nicht direkt durch Kanten mir ihr verbunden sind. Dies ist als das Prinzip der *Lokalität* bekannt.

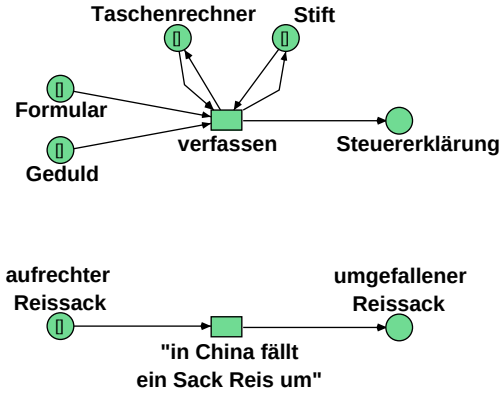


Abbildung 4.16: Unabhängige Aktionen

Betrachte das Petrinetz in Abbildung 4.16, das zwei Aktionen zulässt. Zum einen kann eine Steuererklärung verfasst werden. Das Abfassen der Steuererklärung ist dabei völlig unabhängig von dem sprichwörtlichen Reissack, der in China

umfallen kann. Die Aktivierung der Transition verfassen ist völlig unabhängig von den weiteren Zuständen. Die beiden Transitionen verfassen und in China fällt ein Sack Reis um sind nebenläufig, da die sie umgebenen Stellenmengen disjunkt sind. Nebenläufigkeit und verteilte Repräsentation des Zustandes sind einander bedingende Konzepte, denn Transitionen mit disjunkter Umgebung können nebenläufig schalten.

Aktionen, die keinerlei kausale Abhängigkeiten besitzen, können in beliebiger zeitlicher Abfolge geschehen. Petri selbst schreibt dazu:

> Man geht von der Fiktion aus, daß es stets sinnvoll sei, vom Gesamtzustand Z eines Gesamtsystems S zu einem Zeitpunkt t zu reden. [...] Auch die klassische Physik nimmt eindeutig diesen Standpunkt ein. Die Zweckmäßigkeit dieser Betrachtungsweise wurde erstmals durch die Relativitätstheorie in Frage gestellt. (Petri, 1962, S. 2ff.)

Petri wendet sich mit seinen Überlegungen also gegen das damals omnipräsente Automatenmodell der Informatik: Ein Automat besitzt genau einen globalen Zustand, seine Abläufe sind vollständig geordnet. Petrinetze dagegen besitzen einen verteilten Zustand, der sich anhand der Markierungen der Stellen ergibt.

4.3.1 Petrinetze

Formal ist ein Petrinetz ein gerichteter, bipartiter Graph, der aus zwei disjunkten Mengen besteht: den Stellen P und den Transitionen T. Stellen sind die passiven, Transitionen die aktiven Elemente. Die Flussrelation F beschreibt die Kanten zwischen Stellen und Transitionen.

Definition 4.1 (Petrinetz) *Ein* Petrinetz $N = (P, T, F)$ *besteht aus einer Menge von Stellen P, einer Menge von Transitionen T und einer Flussrelation $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ mit folgenden Eigenschaften:*

1. *Stellen und Transitionen sind disjunkt: $P \cap T = \emptyset$.*
2. *Die Menge der Knoten ist nicht leer: $P \cup T \neq \emptyset$.*

Für ein gegebenes Netz ist der Vorbereich eines Elementes x definiert als ${}^\bullet x := (_Fx) = \{y \mid yFx\}$ und der Nachbereich als $x^\bullet := (xF_) = \{y \mid xFy\}$.
Sei $N = (P, T, F)$ ein Petrinetz.

- N heißt *endlich*, wenn die Mengen P und T endlich sind.
- N heißt *endlich verzweigend*, wenn $|{}^\bullet x| < \infty$ und $|x^\bullet| < \infty$ für alle $x \in P \cup T$ gilt.
- N heißt *schlicht*, wenn Transitionen durch ihren Effekt eindeutig bestimmt sind: $\forall t_1, t_2 \in T : ({}^\bullet t_1 = {}^\bullet t_2 \wedge t_1{}^\bullet = t_2{}^\bullet) \Longrightarrow t_1 = t_2$

- N heißt *F-verbunden*, wenn keine isolierten Elemente existieren: $\mathrm{dom}(F) \cup \mathrm{dom}(F^{-1}) = P \cup T$
- N heißt *schlingenfrei*, wenn $F \cap F^{-1} = \emptyset$ gilt.
- N heißt *T-schlicht*, wenn Transitionen nicht isoliert sind: $\forall t \in T : {}^\bullet t \neq \emptyset \wedge t^\bullet \neq \emptyset$.
- Das Petrinetz $N' = (P', T', F')$ heißt *Teilnetz* von N, wenn $P' \subseteq P$, $T' \subseteq T$ und $F' \subseteq F \cap ((P' \times T') \cup (T' \times P'))$ gilt.

Nach Petri müssen Petrinetze auch immer schlingenfrei und F-verbunden sein. Die Forderung der Schlingenfreiheit verbietet Nebenbedingungen, die auch für die übliche Schaltregel nutzlos sind. Aufgrund der Bedingung der F-Verbundenheit kann dann ein Petrinetz nicht aus einer einzigen Stelle oder einer einzigen Transition bestehen. Da wir beispielsweise Vergröberungen zu einem einzigen Element zulassen wollen, wird F-Verbundenheit nicht gefordert.

Neben der Sequenz und der Nebenläufigkeit gibt es weitere typische Strukturmuster in Petrinetzen, insbesondere die Synchronisation und den Konflikt. Synchronisation beschreibt, dass verschiedene, nebenläufige Handlungsstränge zusammengeführt werden. In Petrinetzen wird dies durch eine Transition mit mehreren Eingangstellen dargestellt. Der Konflikt beschreibt dagegen eine Situation, in der mehrere Transitionen aktiviert sind, jedoch nur eine von ihnen schalten kann. Die Transitionen sind also gerade nicht unabhängig voneinander. Die Tabelle 4.17 zeigt die Grundstruktur dieser Muster, die auch im Kontext der Modellierung von Arbeitsabläufen (engl. work-flows) elementar sind.

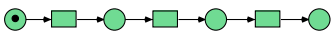
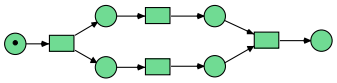
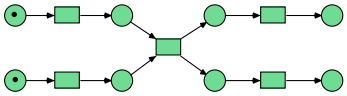
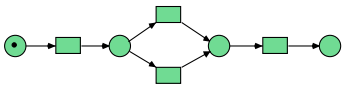
Sequenz	
Nebenläufigkeit	
Synchronisation	
Konflikt	

Abbildung 4.17: Petrinetzgrundstrukturen

4.3.2 Verfeinerung/Vergröberung

Sei $N = (P, T, F)$ ein Netz. Der *Rand* der Menge $Y \subseteq (P \cup T)$ ist definiert als:

$$\partial(Y) := \{y \in Y \mid \exists x \notin Y : x \in ({}^\bullet y \cup y^\bullet)\}$$

Die Menge Y heißt *platzberandet* (oder auch *offen*), falls $\partial(Y) \subseteq P$ gilt und *transitionsberandet* (oder auch *geschlossen*), falls $\partial(Y) \subseteq T$ gilt.

Für eine Vergröberung wird eine platzberandete Menge durch einen Platz bzw. eine transitionsberandete Menge durch eine Transition ersetzt. Eine Menge Y kann sowohl offen als auch abgeschlossen sein, wie beispielsweise: $Y = P \cup T$. In diesem Fall ist explizit anzugeben, ob Y durch einen Platz oder eine Transition ersetzt wird. Der Name des neuen Elements wird zu Y gewählt.

Definition 4.2 *Sei $N = (P, T, F)$ ein Netz. Für eine nicht leere, transitionsberandete Menge Y ist eine* elementare Transitionsvergröberung *von N definiert durch*

$$N[Y]_t = \big((P \setminus Y), (T \setminus Y) \uplus \{Y\}, F[Y]\big)$$

mit

$$\begin{aligned} F[Y] &= \{(x,y) \in F \mid x \notin Y \wedge y \notin Y\} \\ &\cup \{(x,Y) \mid x \notin Y \wedge x^\bullet \cap Y \neq \emptyset\} \\ &\cup \{(Y,x) \mid x \notin Y \wedge {}^\bullet x \cap Y \neq \emptyset\} \end{aligned}$$

Für eine nicht leere, platzberandete Menge Y ist die elementare Platzvergröberung *von N definiert als:*

$$N[Y]_t = \big((P \setminus Y) \uplus \{Y\}, (T \setminus Y), F[Y]\big)$$

Falls Y nicht gleichzeitig platz- und transitionsberandet ist, notieren wir kurz $N[Y]$ anstelle von $N[Y]_t$ bzw. $N[Y]_p$.

Für eine Menge $\{Y_1, \ldots, Y_n\}$ von paarweise disjunkten, platz- oder transitionsberandeten Teilmengen von $P_1 \cup T_1$ wird $N_2 = (\ldots((N_1[Y_1])[Y_2])\ldots[Y_n])$ Vergröberung *von N_1 genannt.*

Ist N_2 Vergröberung von N_1, so heißt N_1 Verfeinerung *von N_2.*

Eine Vergröberung ist strikt*, wenn Y entweder eine Menge von Plätzen oder eine Menge von Transitionen ist.*

Die Vergröberung $N_2 = (\ldots(N_1[Y_1])\ldots[Y_n])$ wird kurz mit $N_2 = N_1[Y_1, \ldots, Y_n]$ bezeichnet.

$N_2 = N_1[Y_1, \ldots, Y_n]$ ist unabhängig von der Ausführung der Vergröberungen, d.h. für jede Permutation beschreibt die Vergröberung $(\ldots(N_1[Y_{\pi(1)}])\ldots[Y_{\pi(n)}]])$ das gleiche Netz.

4.3.3 Netzmorphismen

Wie in algebraischen Theorien allgemein üblich, werden strukturerhaltende Abbildungen *Homomorphismen* oder kürzer *Morphismen* genannt. Im folgenden wird Strukturverträglichkeit für Netze eingeführt.

Unter Strukturverträglichkeit ist zu verstehen, dass bei einer Abbildung ϕ eines Netzes $N_1 = (P_1, T_1, F_1)$ auf $N_2 = (P_2, T_2, F_2)$ die Kanten F „zusammen" mit den Plätzen *F-erhaltend* abgebildet wird:

$$\forall x, y \in (P_1 \cup T_1) : (x,y) \in F_1 \Longrightarrow \Big((\phi(x), \phi(y)) \in F_2 \vee \phi(x) = \phi(y)\Big)$$

Mit anderen Worten, die Abbildung der Kanten ergibt sich aus der Abbildung der Knoten.

Eine F-erhaltende Abbildung ϕ kann die Kantenrichtung umdrehen, indem einer Kante $(p,t) \in F_1$ die Kante $(\phi(p),\phi(t)) \in F_2$ zugeordnet wird, bei der $\phi(p)$ eine Transition und $\phi(t)$ ein Platz ist. Um dies zu verhindern, wird zusätzlich noch gefordert, dass $(x,y) \in F_1 \cap (P_1 \times T_1)$ auch $(\phi(x),\phi(y)) \in F_2 \cap (P_2 \times T_2)$ oder $\phi(x) = \phi(y)$ impliziert. Analog für $(x,y) \in F_1 \cap (T_1 \times P_1)$[7]

Ist der Netzmorphismus ϕ surjektiv, so sind die Bildknoten $P_2 \cup T_2$ aus den Konoten des Netzes N_1 mit ϕ konstruierbar. Gilt zudem noch, dass jede Kante in N_2 ein Abbild einer Kante in N_1 ist, dann wird das Netz N_2 komplett durch N_1 und ϕ konstruierbar. Solche Morphismen heißen Epimorphismen.

Wir definieren für Kanten $(x,y) \in F$ die Notation $\phi(x,y) := (\phi(x),\phi(y))$.

Definition 4.3 *Seien $N_1 = (P_1, T_1, F_1)$ und $N_2 = (P_2, T_2, F_2)$ zwei Netze.*

- *Eine Abbildung $\phi : (P_1 \cup T_1) \to (P_2 \cup T_2)$ heißt* Netzmorphismus*, falls gilt:*

$$\begin{array}{lll} (x,y) \in F_1 \cap (P_1 \times T_1) & \Longrightarrow & \big(\phi(x,y) \in F_2 \cap (P_2 \times T_2) \vee \phi(x) = \phi(y)\big) \\ (x,y) \in F_1 \cap (T_1 \times P_1) & \Longrightarrow & \big(\phi(x,y) \in F_2 \cap (T_2 \times P_2) \vee \phi(x) = \phi(y)\big) \end{array}$$

- *Ein Netzmorphismus ϕ heißt* Faltung*, falls $\phi(P_1) \subseteq P_2$ und $\phi(T_1) \subseteq T_2$ gilt.*

- *Ein Netzmorphismus ϕ ist ein* Epimorphismus*, falls ϕ surjektiv ist und für jede Kante ein Urbild existiert, d.h. für alle $f_2 \in F_2$ existiert ein $f_1 \in F_1$ mit $\phi(f_1) = f_2$*

  Eine Faltung mit dieser Eigenschaft heißt Epifaltung*.*

- *Ein Netzmorphismus ϕ ist ein* Netzisomorphismus*, falls ϕ eine Bijektion ist and ϕ^{-1} ebenfalls ein Netzmorphismus ist.*

Beispielsweise ist für jeden Prozess (R,ϕ) zu einem P/T-Netz N, die Abbildung ϕ eine Faltung. Sie ist im allgemeinen aber keine Epifaltung, da nicht alle Netzelemente von N in einem Prozess vorkommen müssen.

Theorem 4.4 *Seien N_1 und N_2 zwei endliche Netze.*

- *N_2 ist genau dann eine Vergröberung von N_1, wenn es einen Epimorphismus von N_1 nach N_2 gibt.*

- *N_2 ist genau dann eine strikte Vergröberung von N_1, wenn es eine Epifaltung von N_1 nach N_2 gibt.*

Für den Beweis siehe (Girault und Valk, 2003, Theorem 2.5.4).

[7] In der topologischen Terminologie wird also zusätzlich gefordert, dass offene (bzw. abgeschlossene) Mengen ebensolche Urbilder haben.

4.4 Platz/Transitions-Netze

Die Netze, deren Stellen mehrfach markiert sein können, werden als Platz/Transitions-Netze – im folgenden kurz: P/T-Netze – bezeichnet. Da auf einer Stelle mehrere Marken vorhanden sein können, ist es möglich, dass Transitionen mehrere Marken zum Schalten benötigen, was durch eine Kantengewichtung ausgedrückt wird.

Markierungen sind Multimengen. Allgemein bezeichnet man eine Abbildung $\mathbf{m} : P \to \mathbb{N}$ als *Multimenge*. In der Multimenge $\mathbf{m}$ kommt jedes Element $p \in P$ genau $\mathbf{m}(p)$-mal vor. Mengen können als Spezialfall der Multimengen interpretiert werden, für die $\mathbf{m}(p) \leq 1$ für alle $p \in P$ gilt. Die leere Multimenge ist die identische Nullfunktion $\mathbf{0}$, d.h. $\forall x \in X : \mathbf{0}(x) = 0$.

Seien $\mathbf{a}$ und $\mathbf{b}$ zwei Multimengen über der Grundmenge X. Die Summe $\mathbf{a} \oplus \mathbf{b}$ ist für alle $x \in X$ durch $(\mathbf{a} \oplus \mathbf{b})(x) := \mathbf{a}(x) + \mathbf{b}(x)$ definiert, die Differenz $\mathbf{a} \ominus \mathbf{b}$ durch $(\mathbf{a} \ominus \mathbf{b})(x) := \max(\mathbf{a}(x) - \mathbf{b}(x), 0)$. Das Minimum $\min(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ ist für alle $x \in X$ durch $\min(\mathbf{a}, \mathbf{b})(x) = \min(\mathbf{a}(x), \mathbf{b}(x))$ definiert, das Maximum $\max(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ durch $\max(\mathbf{a}, \mathbf{b})(x) = \max(\mathbf{a}(x), \mathbf{b}(x))$.

Gleichheit $\mathbf{a} = \mathbf{b}$ gilt im Falle elementweiser Übereinstimmung: $\forall x \in X : \mathbf{a}(x) = \mathbf{b}(x)$. Multimengen sind durch $\mathbf{a} \leq \mathbf{b} \iff \forall x \in X : \mathbf{a}(x) \leq \mathbf{b}(x)$ partiell geordnet. Die strikte Ordnung $\mathbf{a} < \mathbf{b}$ (auch: $\mathbf{a} \lneq \mathbf{b}$) gilt genau dann, wenn $\mathbf{a} \leq \mathbf{b}$ und $\mathbf{a} \neq \mathbf{b}$ gilt.

Die Kardinalität ergibt sich zu $|\mathbf{a}| := \sum_{x \in X} \mathbf{a}(x)$. Die Trägermenge einer Multimenge ist definiert als $\mathrm{dom}(\mathbf{a}) := \{x \in X \mid \mathbf{a}(x) > 0\}$. Eine Multimenge $\mathbf{a}$ heißt *endlich*, wenn $|\mathbf{a}| < \infty$ gilt. Endliche Multimengen über X besitzen die Struktur eines kommutativen Monoids $(X^{\oplus}, \oplus, \mathbf{0})$. Jede Abbildung $f : X \to Y$ erzeugt die homorphe Erweiterung $f^{\oplus} : X^{\oplus} \to Y^{\oplus}$ auf Multimengen:

$$f^{\oplus}(x_1 \oplus \cdots \oplus x_n) := f(x_1) \oplus \cdots \oplus f(x_n)$$

Eine Markierung ist eine endliche Multimenge $\mathbf{m} : P \to \mathbb{N}$, d.h. initial existieren nur endlich viele Marken. Es sind also auch überhaupt nur endlich viele Stellen markiert. Für endliche Netze ist diese Bedingung stets erfüllt.

Definition 4.5 *Ein* P/T-Netz $N = (P, T, F, W)$ *besteht aus einem endlich verzweigenden Petrinetz* (P, T, F) *und einer Kantengewichtungsfunktion* $W : F \to \mathbb{N} \setminus \{0\}$.

Eine Markierung von N *ist eine endliche Multimenge* $\mathbf{m} : P \to \mathbb{N}$.

Ein P/T-System $N = (P, T, F, W, \mathbf{m}_0)$ *besteht aus einem P/T-Netz* (P, T, F, W) *und einer Initialmarkierung* $\mathbf{m}_0$.

Wir verwenden den Begriff P/T-Netz im folgenden auch für P/T-Systeme. Statt $\mathbf{m} : P \to \mathbb{N}$ ist es auch üblich, $\mathbf{m} \in \mathbb{N}^P$ zu schreiben. Für endliche Stellenmengen werden Markierung $\mathbf{m} \in \mathbb{N}^P$ auch als Vektoren dargestellt: $\mathbf{m} \in \mathbb{N}^{|P|}$. Hierzu muss eine beliebige, aber feste lineare Ordnung $p_1 < p_2 < \ldots < p_n$ auf den Stellen $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$ fixiert werden:

$$\mathbf{m} = (\mathbf{m}(p_1), \ldots, \mathbf{m}(p_n))^{\top}$$

Die Eigenschaft von Petrinetzen (Endlichkeit usw.) übertragen sich auf P/T-Netze, indem wir definieren, dass ein P/T-Netz $N = (P, T, F, W)$ eine Eigenschaft genau dann besitzt, wenn das zugrundeliegende Petrinetz (P, T, F) diese besitzt. Ein P/T-Netz $N = (P, T, F, W)$ heißt *simpel*, wenn $W(x, y) \leq 1$ für alle $(x, y) \in F$ gilt.

Die Abbildung $W : F \to \mathbb{N} \setminus \{0\}$ wird kanonisch auf eine Abbildung $W' : (P \times T) \cup (T \times P) \to \mathbb{N}$ erweitert:

$$W'(x, y) := \begin{cases} W(x, y), & \text{falls } (x, y) \in F \\ 0, & \text{falls } (x, y) \notin F \end{cases} \tag{4.1}$$

Umgekehrt generiert jede Abbildung $W' : (P \times T) \cup (T \times P) \to \mathbb{N}$ die Flussrelation:

$$F = \{(x, y) \mid W'(x, y) > 0\}$$

Die Kantengewichtungsfunktion W' kodiert also implizit die Flussrelation F. In der obigen Definition könnte daher auch auf die Angabe von F verzichtet werden, da W – interpretiert als Multirelation – beide Aufgaben erfüllt, d.h. man kann sowohl durch $(p, t) \in W$ den Fluss als auch durch $W(p, t)$ das Kantengewicht ausdrücken. Ein P/T-Netz wird dann durch $N = (P, T, W)$ definiert.

In Anlehnung an die Kategorientheorie existiert die Darstellung eines Netzes $N = (P, T, F, W)$ durch die Struktur $N = (P, T, \partial_0, \partial_1)$, wobei $\partial_0, \partial_1 : T \to P^{\oplus}$ Abbildungen sind, die jeder Transition ihren Vorbereich bzw. ihren Nachbereich aus dem kommutativem Markenmonoid $P^{\oplus}$ zuordnen (vgl. Winskel, 1986).

Die beiden Darstellungen können leicht ineinander überführt werden (und werden im folgenden als austauschbar betrachtet): Es gilt $\partial_0(t)(p) := W(p, t)$ und $\partial_1(t)(p) := W(t, p)$, was sich auch als durch den Multimengenausdruck darstellen lässt:

$$\partial_0(t) := \bigoplus_{p \in P} W(p, t) \cdot p \quad \text{bzw.} \quad \partial_1(t) := \bigoplus_{p \in P} W(t, p) \cdot p$$

Hierbei bezeichnet $\oplus$ die Addition auf dem kommutativen Monoid $P^{\oplus}$ der endlichen Multimengen über P.

Umgekehrt ergibt sich für die Flussrelation $(p, t) \in F \iff |\partial_0(t)(p)| > 0$ bzw. $(t, p) \in F \iff |\partial_1(t)(p)| > 0$ und für die Gewichtungsfunktion $W(p, t) = \partial_0(t)(p)$ und $W(t, p) = \partial_1(t)(p)$.

Der *Effekt* wird durch die Abbildung Δ definiert:

$$\Delta := \partial_1 - \partial_0 \tag{4.2}$$

Man beachte, dass $\Delta(t)(p)$ ein Element aus $\mathbb{Z}$ und nicht aus $\mathbb{N}$ ist. Der Effekt wird für endliche P/T-Netze als Matrix repräsentiert. Für schlingenfreie Netze können die Abbildungen ∂_0, ∂_1 aus Δ rekonstruiert werden: Setze $\partial_1(t)(p) = \Delta(t)(p)$, falls $\Delta(t)(p) > 0$ und $\partial_1(t)(p) = 0$, andernfalls. Setze $\partial_0(t)(p) = \Delta(t)(p)$, falls $\Delta(t)(p) < 0$ und $\partial_0(t)(p) = 0$, andernfalls.

Definition 4.6 *Sei $N = (P, T, F, W, \mathbf{m}_0)$ ein P/T-Netz und $\mathbf{m}$ eine Markierung von N. Eine Transition $t \in T$ ist in der Markierung $\mathbf{m}$ aktiviert, gdw.*

genügend Marken vorhanden sind: $\mathbf{m}(p) \geq W(p,t)$ *für alle* $p \in P$. *Die* Aktivierung *von* t *in* $\mathbf{m}$ *wird als* $\mathbf{m} \xrightarrow[N]{t}$ *notiert.*

Eine Transition $t \in T$, *die in der Markierung* $\mathbf{m}$ *aktiviert ist, kann mit* t *in die* Nachfolgemarkierung $\mathbf{m}'$ *schalten, die für alle* $p \in P$ *definiert ist durch:*

$$\mathbf{m}'(p) = \mathbf{m}(p) - W(p,t) + W(t,p)$$

Das Schalten von t *wird als* $\mathbf{m} \xrightarrow[N]{t} \mathbf{m}'$ *notiert.*

Ist das Netz N *aus dem Kontext klar, so wird die Aktivierung kurz als* $\mathbf{m} \xrightarrow{t}$ *und das Schalten als* $\mathbf{m} \xrightarrow{t} \mathbf{m}'$ *notiert.*

Die Aktivierungsbedingung und die Schaltregel lassen sich in der Multimengen-Darstellung von N wie folgt angeben: Eine Transition t heißt in der Markierung $\mathbf{m}$ aktiviert, wenn $\mathbf{m} \geq \partial_0(t)$ gilt – mit der Ordnung $\geq$ auf Multimengen. Eine in der Markierung $\mathbf{m}$ aktivierte Transition kann in die Markierung $\mathbf{m}'$ schalten, wobei gilt:

$$\mathbf{m}' := \mathbf{m} \oplus \partial_1(t) \ominus \partial_0(t) = \mathbf{m} \oplus \Delta(t)$$

Lemma 4.7 *Wenn* $\mathbf{m}_1 \xrightarrow{\sigma}$ *und* $\mathbf{m}_2 \xrightarrow{\sigma}$ *gilt, dann auch* $\min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) \xrightarrow{\sigma}$.

Beweis: Beweis per Induktion. Für $\sigma = \epsilon$ gilt $\mathbf{m} \xrightarrow{\sigma}$ für jedes $\mathbf{m}$.

Für $\sigma = \sigma' t$ sei nun $\mathbf{m}_{1,2} \xrightarrow{\sigma'} \mathbf{m}'_{1,2}$ mit der Induktionsannahme $\min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) \xrightarrow{\sigma'} \mathbf{m}'$ für ein $\mathbf{m}'$.

1. Gilt $\mathbf{m}_1(p) \leq \mathbf{m}_2(p)$, dann ist $\mathbf{m}'(p) = \min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2)(p) + \Delta(\sigma')(p) = \mathbf{m}_1(p) + \Delta(\sigma')(p) = \mathbf{m}'_1(p)$.

2. Gilt $\mathbf{m}_1(p) \geq \mathbf{m}_2(p)$, dann ist $\mathbf{m}'(p) = \min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2)(p) + \Delta(\sigma')(p) = \mathbf{m}_2(p) + \Delta(\sigma')(p) = \mathbf{m}'_2(p)$.

Aus $\mathbf{m}_{1,2} \xrightarrow{\sigma}$ folgt $\mathbf{m}'_{1,2} \xrightarrow{t}$. Damit gilt dann auch $\min(\mathbf{m}'_1, \mathbf{m}'_2) \xrightarrow{t}$. q.e.d.

Das Schalten $\mathbf{m} \xrightarrow{t} \mathbf{m}'$ einer Transition aus der Markierung $\mathbf{m}$ in die Nachfolgemarkierung $\mathbf{m}'$ wird auf *Schaltfolgen* erweitert.

Definition 4.8 *Schaltfolgen* $w \in T^*$ *sind Wörter über* T: $w = t_1 \cdot t_2 \cdots t_n$.

- *Falls* $|w| = 0$, *ist* $w = \epsilon$ *und* $\mathbf{m} \xrightarrow{\epsilon} \mathbf{m}$.
- *Falls* $\mathbf{m} \xrightarrow{t_1 t_2 \cdots t_{n-1}} \mathbf{m}'$ *und* $\mathbf{m}' \xrightarrow{t_n} \mathbf{m}''$ *gilt, dann ist* $\mathbf{m} \xrightarrow{t_1 t_2 \cdots t_n} \mathbf{m}''$.

Die Menge der Schaltfolgen aus der Markierung $\mathbf{m}$ *ist die Menge* $FS(\mathbf{m}) := \{w \in T^* \mid \mathbf{m} \xrightarrow{w}\}$.

Eine unendliche Schaltfolge $\omega \in T^\omega$ *ist aktiviert, wenn jeder endliche Präfix von* ω *aktiviert ist.*

Für die Nachfolgemarkierung $\mathbf{m}''$ von $\mathbf{m} \xrightarrow{t_1 t_2 \cdots t_n} \mathbf{m}''$ gilt:

$$\mathbf{m}'' := \mathbf{m} + \Delta(t_1) + \cdots + \Delta(t_n)$$

Dies kann mit dem *Parikh-Vektor* $\Psi(w) \in \mathbb{N}^{|T|}$ des Wortes $w \in T^*$ kompakter dargestellt werden. $\Psi(w)(t)$ ist gleich der Anzahl des Vorkommens von t in w:

$$\Psi(w)(t) := |w|_t \tag{4.3}$$

Nutzen wir nun aus, dass $\Delta(t) = \Delta \cdot e_t$ (wobei e_t der Einheitsvektor von t ist), so

$$\Delta(w) = \Delta(t_1 \cdots t_n) = \Delta(t_1) + \cdots + \Delta(t_n) = \sum_{t \in T} \Delta(t) \cdot |w|_t = \Delta \cdot \Psi(w) \tag{4.4}$$

Damit ergibt sich für alle $\mathbf{m}_1 \xrightarrow{w} \mathbf{m}_2$ die Vektor-Gleichung:

$$\mathbf{m}_2 = \mathbf{m}_1 + \Delta \cdot \Psi(w) \tag{4.5}$$

Daraus sieht man, dass für alle aktivierten Schaltfolgen $\mathbf{m}_1 \xrightarrow{w} \mathbf{m}_2$ der Vektor $x = \Psi(w)$ eine Lösung der folgenden linearen Gleichung sein muss:

$$\Delta \cdot x = (\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1)$$

Leider ist dies nur ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium.

Eine Markierung $\mathbf{m}$ heißt *Hürde* für $\sigma \in T^*$, falls sie die kleinste σ aktivierende Markierung darstellt, d.h. falls $\mathbf{m} \xrightarrow{\sigma}$ und $\forall \mathbf{m}' \leq \mathbf{m} : \neg \mathbf{m} \xrightarrow{\sigma}$ gilt.

Lemma 4.9 *Zu jedem $\sigma \in T^*$ ist die Hürde eindeutig bestimmt. Sie wird mit $H(\sigma)$ bezeichnet.*

Beweis: Gäbe es zwei verschiedene Hürden $\mathbf{m}_1$ und $\mathbf{m}_2$. Für diese gilt $\mathbf{m}_1 \xrightarrow{\sigma}$ und $\mathbf{m}_1 \xrightarrow{\sigma}$, so dass nach Lemma 4.7 dann auch $\min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) \xrightarrow{\sigma}$ gilt und da $\mathbf{m}_1 \neq \mathbf{m}_2$ folgt damit $\min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) < \mathbf{m}_1$ oder $\min(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) < \mathbf{m}_2$ im Widerspruch zu der Annahme, dass sowohl $\mathbf{m}_1$ als auch $\mathbf{m}_2$ als Hürden bereits minimal sind. q.e.d.

Es gilt für alle Markierungen $\mathbf{m}, \mathbf{m}'$ und jedes Schaltfolge $\sigma \in T^*$:

1. $\mathbf{m} \xrightarrow{\sigma} \iff \mathbf{m} \geq H(\sigma)$
2. $\mathbf{m} \xrightarrow{\sigma} \mathbf{m}' \iff \mathbf{m} \geq H(\sigma) \wedge \mathbf{m}' = \mathbf{m} + \Delta(\sigma)$
3. $H(\sigma) + \Delta(\sigma) \geq \mathbf{0}$

Die Menge $RS_n(\mathbf{m})$ der aus der Markierung $\mathbf{m}$ in $n \in \mathbb{N}$ Schaltschritten *erreichbaren Markierungen* ist folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} RS_{k+1}(\mathbf{m}) &:= RS_k(\mathbf{m}) \cup \{\mathbf{m}' \mid \exists \mathbf{m}'' \in RS_k(\mathbf{m}) : \exists t \in T : \mathbf{m}'' \xrightarrow{t} \mathbf{m}'\} \\ RS_0(\mathbf{m}) &:= \{\mathbf{m}\} \end{aligned} \tag{4.6}$$

Es gilt die Monotonie der Erreichbarkeitsmengen:

$$RS_k(\mathbf{m}) \subseteq RS_{k+1}(\mathbf{m})$$

Die Mengen $RS_k(\mathbf{m})$ bilden eine aufsteigende Folge in dem Verband aller Markierungen. Somit existiert der Grenzwert, der die Menge der *erreichbaren Markierungen* definiert:

$$RS(\mathbf{m}) = \lim_{k\to\infty} RS_k(\mathbf{m}) \tag{4.7}$$

Ist das Netz nicht aus dem Kontext klar, so schreiben wir auch $RS(N, \mathbf{m})$. Speziell für ein Netzsystem $N = (P, T, F, W, \mathbf{m}_0)$ ist $RS(N) := RS(N, \mathbf{m}_0)$ die Menge der von der Initialmarkierung erreichbaren Markierungen.

Die Definition einer Markierung von N als eine totale Abbildung $\mathbf{m} : P \to \mathbb{N}$ mit endlichem Träger ist äquivalent zur Darstellung als endliche Multimenge $\mathbf{m} \in \mathbb{N}^P$. Markierungen werden als formale Summen der Form $\mathbf{m} = p_1 \oplus \cdots \oplus p_n = \bigoplus_{i=1}^{n} p_i$ mit $p_i \in P$ notiert. Wir können dabei gleiche Stellen p_i zur kanonischen Darstellung zusammenfassen:

$$\mathbf{m} = \bigoplus_{p\in P} \mathbf{m}(p) \cdot p$$

4.4.1 Der Erreichbarkeitsgraph

Petrinetze besitzen – unter anderem – eine Semantik ihres Verhaltens in Form eines Transitionssystems. Sei $N = (P, T, F, W, \mathbf{m}_0)$ ein Netz. Das zugehörige Transitionssystem

$$TS(N) = (Z, A, \mathrm{src}, \mathrm{trg})$$

ergibt sich wie folgt: Die Menge der Zustände ergibt sich als die Menge aller möglichen Markierungen, d.h. die Menge aller Multimengen über der Stellenmenge: $Z = \mathbb{N}^P$. Die Menge der Aktionen A ergibt sich in beiden Fällen aus den Schaltmöglichkeiten im Netz. Gilt $\mathbf{m} \xrightarrow{t} \mathbf{m}'$ für zwei Markierungen $\mathbf{m}$ und $\mathbf{m}' \in \mathbb{N}^P$, dann ist $(\mathbf{m}, t, \mathbf{m}')$ eine Aktion des Transitionssystems. Der Subskript ist notwendig, um zwischen verschiedenen Übergängen unterscheiden zu können.

$$A_N := \{(\mathbf{m}, t, \mathbf{m}') \mid \mathbf{m} \xrightarrow[N]{t} \mathbf{m}' \wedge \mathbf{m}, \mathbf{m}' \in \mathbb{N}^P\}$$

Für diese Darstellung der Transitionen ergeben sich die Abbildungen $\mathrm{src}, \mathrm{trg} : A_N \to Z$ wie üblich. Schränkt man die Menge der Zustände auf die erreichbaren Markierungen $RS(N, \mathbf{m}_0) \subseteq \mathbb{N}^P$ ein, so erhält man den erreichbaren Teil des Transitionssystems, der als *Erreichbarkeitsgraph* (engl. reachability graph) bekannt ist:

$$RG(N, \mathbf{m}_0) := (Z, A, \mathrm{src}|_A, \mathrm{trg}|_A) \tag{4.8}$$

mit $Z = RS(N, \mathbf{m}_0)$ und $A = A_N \cap (Z \times T \times Z)$.

Der Algorithmus 4.18 beschreibt eine Graphensuche mit Zyklenkontrolle, die von der Initialmarkierung $\mathbf{m}_0$ ausgeht. Zu jedem Zeitpunkt ist (V, E) der bislang explorierte Erreichbarkeitsgraph. Die noch zu untersuchenden Zustände sind in der Menge U. Zu der Anfangsmarkierung $\mathbf{m}_0$ wird für jede Transition geprüft, ob

sie aktiviert ist. Wir nehmen an, dass eine lineare Ordnung auf den Transitionen gegegben ist:

$$t_1 < \cdots < t_{|T|}$$

Der Algorithmus wird rekursiv auf jede Nachfolgemarkierung angewendet. Nachfolgezustände, die bereits zuvor generiert wurden, werden nicht erneut entfaltet.

Da der Erreichbarkeitsgraph eines Netzes im allgemeinen nicht endlich ist, terminiert der Algorithmus 4.18 im allgemeinen nicht.

---

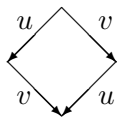
function $RG(N, \mathbf{m}_0)$ is
    $U := \{\mathbf{m}_0\}$; $V := \{\mathbf{m}_0\}$; $E := \{\}$;
    while $\exists \mathbf{m} \in U$ do
        $U = U - \{m\}$;
        for $t = t_1$ to $t_{|T|}$ do
            if $\exists \mathbf{m}' : \mathbf{m} \xrightarrow{t} \mathbf{m}'$ then
                if $\mathbf{m}' \notin V$ then $U = U \cup \{\mathbf{m}'\}$; $V = V \cup \{\mathbf{m}'\}$
            $E = E \cup \{(\mathbf{m}, t, \mathbf{m}')\}$
    endwhile
    return (V, E)
end

Abbildung 4.18: Algorithmus zur Erzeugung des Erreichbarkeitsgraphen

4.4.2 Monoidale Struktur der Petrinetze

Relevante formale Beschreibungstechniken verteilter Systeme basieren in hohem Maße auf dem Konzept nebenläufiger Ereignisse. Einfache Transitionssysteme sind zu strukturarm, um zentrale Systemeigenschaften strukturell adäquat behandeln zu können. Nebenläufigkeit von Ereignissen bedeutet, dass Ereignisse unabhängig von einander stattfinden können. Die Ausdrucksmächtigkeit der Petrinetze, Nebenläufigkeit zu spezifizieren, geht in der Darstellung durch Transitionssysteme (bzw. in der Darstellung durch den Erreichbarkeitsgraphen) verloren.

Betrachten wir zunächst den Spezialfall schlingenfreier Netze. Notwendig (aber nicht hinreichend) für die Nebenläufigkeit ist, dass Ereignisse u und v in einer beliebigen Reihenfolge passieren können. Im Erreichbarkeitsgraphen finden sich dann rautenförmige Strukturen:



Theorem 4.10 *Sei $N = (P, T, F, W)$ ein schlingenfreies Netz und $\mathbf{m} \in P^{\oplus}$ und $u, v \in T$. Gilt $\mathbf{m} \xrightarrow{uv}$ und $\mathbf{m} \xrightarrow{v}$, dann auch $\mathbf{m} \xrightarrow{vu}$.*

Beweis: Sei $p \in P$. Nach Annahme gilt (i) $\mathbf{m}(p) \geq \partial_0(u)(p)$, (ii) $\mathbf{m}(p) \geq \partial_0(v)(p)$ und (iii) $\mathbf{m}(p) - \partial_0(u)(p) + \partial_1(u)(p) \geq \partial_0(v)(p)$.
Wir wollen zeigen: (iv) $\mathbf{m}(p) - \partial_0(v)(p) + \partial_1(v)(p) \geq \partial_0(u)(p)$.

1. Gilt $p \notin {}^\bullet v$, dann ist $\partial_0(v)(p) = 0$ und (iv) vereinfacht sich zu $\mathbf{m}(p) + \partial_1(v)(p) \geq \partial_0(u)(p)$, was aus (i) folgt.

2. Gilt $p \in {}^\bullet v$, dann ist $\partial_1(v)(p) = 0$.

   a) Gilt $p \notin {}^\bullet u$, dann ist $\partial_0(u)(p) = 0$. Also vereinfacht sich (iv) zu $\mathbf{m}(p) - \partial_0(v)(p) \geq 0$, was mit (ii) identisch ist.

   b) Gilt $p \in {}^\bullet u$, dann ist $\partial_1(u)(p) = 0$. Also vereinfacht sich (iii) zu $\mathbf{m}(p) - \partial_0(u)(p) \geq \partial_0(v)(p)$, was mit (iv) identisch ist.

Damit ist (iv) bewiesen. q.e.d.

Die Schlingenfreiheit ist dabei zentral, wie Abbildung 4.19 zeigt, denn für das dargestellte Netz gilt die Aussage nicht.

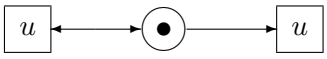


Abbildung 4.19: Die Transitionen u und v sind nicht permutierbar

Betrachten wir nun den Allgemeinfall. Eine Beschreibung von Nebenläufigkeit ist erst möglich, wenn sowohl die Zustände als auch die Aktionen eine Substruktur besitzen, die im Fall der Petrinetze eine Multimengenstruktur ist. Multimengen von Stellen beschreiben einen strukturierten Zustand, Multimengen von Transitionen beschreiben einen nebenläufigen Übergang. Ein solcher Ansatz wird von Bruni u. a. (1998) durch den Formalismus der *nebenläufigen Transitionssysteme* beschrieben.

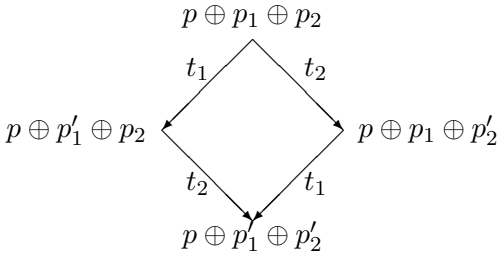


Abbildung 4.20: Ein Erreichbarkeitsgraph

Betrachte wir das Petrinetz in Abbildung 4.20: Der Zustand $\mathbf{m}_4 = p \oplus p_1' \oplus p_2'$ kann von $\mathbf{m}_1 = p \oplus p_1 \oplus p_2$ sowohl durch die Transitionsfolge $t_1 t_2$ als auch durch $t_2 t_1$ erreicht werden, wodurch sich die rautenförmige Struktur des Erreichbarkeitsgraphen ergibt. Die Rautenform beschreibt jedoch nicht notwendigerweise Nebenläufigkeit t_1 und t_2: Für das Petrinetz aus Abbildung 4.21 sind t_1 und t_2 nebenläufig aktiviert, für das Petrinetz aus Abbildung 4.22 können die Transition t_1 und t_2 zwar in beliebiger Reihenfolge schalten, aber nicht unabhängig

voneinander. So ist es nicht möglich, mit Hilfe des Erreichbarkeitsgraphen (bzw. mit einfachen Transitionssystemen) die Petrinetze aus Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 bzgl. ihrer Nebenläufigkeit zu unterscheiden. Nebenläufigkeit ist also ein stärkeres Konzept als die Permutation von Transitionen in Schaltsequenzen.[8]

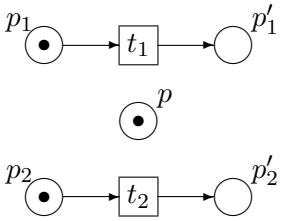


Abbildung 4.21: Das Petrinetz N_1

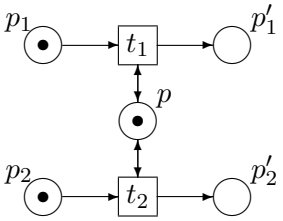


Abbildung 4.22: Das Petrinetz N_2

Die zur Beschreibung von Nebenläufigkeit benötigte Unterstruktur wird mit Hilfe des Nebenläufigkeitsoperators $\oplus$ gebildet. Für das Beispiel aus Abbildung 4.21 wird der Übergang also durch $t_1 \oplus t_2$ beschrieben, wie in Abbildung 4.23 dargestellt. Es gilt $\partial_0^{\oplus}(t_1 \oplus t_2) = \partial_0(t_1) \oplus \partial_0(t_2) = p_1 \oplus p_2$ und $\partial_1^{\oplus}(t_1 \oplus t_2) = \partial_1(t_1) \oplus \partial_1(t_2) = p'_1 \oplus p'_2$. Die komplexe Transition $(t_1 \oplus t_2)$ realisiert den nebenläufigen Übergang $(p_1 \oplus p_2) \xrightarrow{(t_1 \oplus t_2)} (p'_1 \oplus p'_2)$. Das Beispiel aus Abbildung 4.22 besitzt dagegen weiterhin die Darstellung aus Abbildung 4.20. Es ist also mit Hilfe von nebenläufigen Transitionssystemen möglich, die Netze aus Abbildung 4.21 und 4.22 zu unterscheiden.

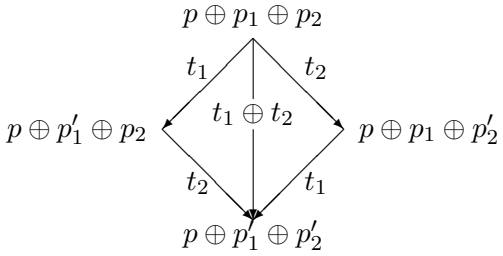


Abbildung 4.23: Ein Erreichbarkeitsgraph mit Nebenläufigkeitsinformation

4.4.3 Beschränktheit

Eine besondere Klasse stellen diejenigen Petrinetze dar, deren Erreichbarkeitsgraph endlich ist, was gleichbedeutend mit der Tatsache ist, dass für alle erreichbaren Markierungen die Anzahl der Marken auf allen Stellen beschränkt ist.

Definition 4.11 *Sei $N = (P, T, F, W)$ ein P/T-Netz mit der Initialmarkierung $\mathbf{m}_0$.*

[8] Permutation bzw. Austauschbarkeit von Aktionen, wie sie z.B. Mazurkiewicz-traces (Mazurkiewicz, 1987) beschreiben, ist aber die Folge von Nebenläufigkeitseigenschaften.

- *Eine Stelle $p \in P$ heißt* k-beschränkt *für $\mathbf{m}_0$, wenn $\mathbf{m}(p) \leq k$ für alle erreichbaren Markierungen $\mathbf{m} \in RS(N, \mathbf{m}_0)$ gilt.*
- *Ein Stelle p heißt* beschränkt*, wenn p für ein k auch k-beschränkt ist.*
- *N heißt* k-beschränkt *(auch:* k-sicher*), wenn alle seine Stellen k-beschränkt sind.*
- *N heißt* beschränkt*, wenn alle seine Stellen dies sind.*
- *N heißt* strukturell beschränkt*, wenn es für jede mögliche Initialmarkierung beschränkt ist.*
- *Ein* 1*-sicheres P/T-Netz heißt* sicher*.*

Ein P/T-Netz N ist in der Markierung $\mathbf{m}_0$ genau dann beschränkt, wenn es für alle Stellen eine universelle Schranke n für die Markenzahl $\mathbf{m}(p)$ gibt:

$$\exists n \in \mathbb{N} : \forall p \in P : \forall \mathbf{m} \in RS(N, \mathbf{m}_0) : \mathbf{m}(p) < n$$

Theorem 4.12 *Folgende Aussagen sind für gegebenes $(N, \mathbf{m}_0)$ äquivalent:*

1. *Die Menge der erreichbaren Markierungen $RS(N, \mathbf{m}_0)$ ist endlich.*
2. *Der Erreichbarkeitsgraph $RG(N, \mathbf{m}_0)$ ist endlich.*
3. *N ist in der Markierung $\mathbf{m}_0$ beschränkt.*
4. *Es gibt keine Markierungen $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ mit $\mathbf{m}_2 > \mathbf{m}_1$ und $\mathbf{m}_0 \xrightarrow{*} \mathbf{m}_1 \xrightarrow{+} \mathbf{m}_2$.*

Beweis:

1. Ist der Erreichbarkeitsgraph endlich, so ist auch seine Knotenmenge endlich, die aber gleich der Menge der erreichbaren Markierungen $RS(N, \mathbf{m}_0)$ ist.

   Ist die Menge der erreichbaren Markierungen $RS(N, \mathbf{m}_0)$ endlich, dann muss der Erreichbarkeitsgraph $RG(N, \mathbf{m}_0)$ endlich sein, da seine Knotenmenge gleich $RS(N, \mathbf{m}_0)$ ist und zwischen endlich vielen Knoten nur endlich viele Kanten existieren.

2. Ist N ist in der Markierung $\mathbf{m}_0$ beschränkt mit der Schranke k, dann kann es nicht mehr als $(1 + k)^{|P|}$ verschiedene Markierungen geben, d.h. $RS(N, \mathbf{m}_0)$ ist endlich.

   Ist $RS(N, \mathbf{m}_0)$ endlich, so ist die größte Zahl, die in einer Komponente $\mathbf{m}(p)$ eines Elements $\mathbf{m} \in RS(N, \mathbf{m}_0)$ vorkommt, eine Beschränkung von N.

3. Wir zeigen, dass N in der Markierung $\mathbf{m}_0$ genau dann unbeschränkt ist, wenn $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ mit $\mathbf{m}_2 > \mathbf{m}_1$ und $\mathbf{m}_0 \xrightarrow{*} \mathbf{m}_1 \xrightarrow{*} \mathbf{m}_2$ gibt:

Gilt $\mathbf{m}_0 \xrightarrow{*} \mathbf{m}_1 \xrightarrow{w} \mathbf{m}_2$ mit $\mathbf{m}_2 > \mathbf{m}_1$, dann ist N unbeschränkt, denn aufgrund der Monotonie aktiviert $\mathbf{m}_2$ ebenfalls w. Definiere $\delta = \mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1 > \mathbf{0}$. Man erhält somit eine Folge monton steigender Markierungen:

$$\mathbf{m}_1 \xrightarrow{w} \mathbf{m}_1 + \delta \xrightarrow{w} \mathbf{m}_1 + 2\delta \xrightarrow{w} \cdots \xrightarrow{w} \mathbf{m}_1 + n\delta \xrightarrow{w} \cdots$$

Die Folge steigt dabei für alle Stellen der Menge $\{p \in P \mid \mathbf{m}_1(p) < \mathbf{m}_2(p)\}$ streng monoton an.

Sei N unbeschränkt. Sei V_i die Menge aller Knoten im Erreichbarkeitsgraphen, die von $\mathbf{m}_0$ in genau i Kanten zu erreichen sind. (Dies sind die Knoten, die bei der Breitensuche in der i-ten Ebene stehen.) Da der Erreichbarkeitsgraph endlich verzweigt, sind alle V_i endlich. Da er unendlich ist, ist kein V_i leer.

Zu jedem Knoten $\mathbf{m}_{i+1} \in V_{i+1}$ gibt es einen Knoten $\mathbf{m}_i \in V_i$, so dass $(\mathbf{m}_i, t, \mathbf{m}_{i+1})$ eine Kante ist. Wir finden daher eine unendliche Folge $F = (\mathbf{m}_i)_{i\in\mathbb{N}}$, zu der eine monotone Teilfolge F' existiert. Da jede Markierung in höchstens einem V_i vorkommt, kommt kein Element in F doppelt vor und F' ist sogar streng monoton wachsend. Also gibt es beliebig viele $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ mit $\mathbf{m}_2 > \mathbf{m}_1$.

Damit ist die Äquivalenz aller Aussagen gezeigt. q.e.d.

4.4.4 Lebendigkeit

Lebendigkeit von Transitionen formalisiert den Aspekt, ob und wie oft Transitionen aktiviert werden können.

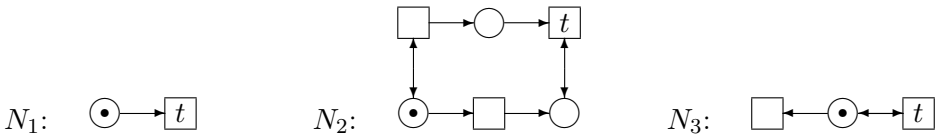
Definition 4.13 *Eine Transition t heißt in der Markierung $\mathbf{m}$ ...*

- *1-lebendig, wenn $\mathbf{m}' \in RS(N, \mathbf{m})$ mit $\mathbf{m}' \xrightarrow{t}$ existiert,*
- *2-lebendig, wenn für alle $n \in \mathbb{N}$ Schaltworte $w_1, \ldots, w_n \in T^*$ existieren, so dass $\mathbf{m} \xrightarrow{w_1 t \cdots w_n t}$ gilt,*
- *3-lebendig, wenn eine unendliche Schaltfolge $\omega \in T^\omega$ mit $\mathbf{m} \xrightarrow{\omega}$ existiert, so dass t in ω unendlich oft vorkommt und*
- *4-lebendig, wenn für alle $\mathbf{m}' \in RS(N, \mathbf{m})$ ein $\mathbf{m}'' \in RS(N, \mathbf{m}')$ existiert, so dass $\mathbf{m}'' \xrightarrow{t}$ gilt.*
- *Eine in $\mathbf{m}$ 4-lebendige Transition t heißt kurz lebendig.*
- *Eine Transition t, die in $\mathbf{m}$ nicht einmal 1-lebendig ist, heißt* tot.

Das P/T- Netz heißt lebendig, *wenn alle seine Transitionen dies sind.*
Ein P/T-Netz heißt strukturell lebendig, *wenn es für mindestens eine Initialmarkierung lebendig ist.*

Theorem 4.14 *Sei N ein beliebiges Netz. Eine $(i+1)$-lebendige Transition von N ist stets auch i-lebendig, aber im allgemeinen nicht umgekehrt.*

Beweis: Dass die höhere Form der Lebendigkeit die jeweils niedrigere umfasst, folgt aus der Definition. Dass die Umkehrung im allgemeinen nicht gilt, zeigen folgende Beispiele:



Im Netz N_1 ist t zwar 1-, aber nicht 2-lebendig, in N_2 ist t zwar 2-, aber nicht 3-lebendig und in N_3 ist t zwar 3-, aber nicht 4-lebendig. q.e.d.

4.5 Prozesse von Petrinetzen

Der Erreichbarkeitsgraph beschreibt eine zustandsorientierte Sichtweise auf das Verhalten eines Systems. Allerdings ist es nicht möglich, den Marken eine Individualität zuzusprechen. Betrachte die Abbildung 4.24: In der Entwicklung durch die Schaltfolge

$$p_1 \oplus p_1 \xrightarrow{t_1} p_1 \oplus p_2 \xrightarrow{t_2} p_1 \oplus p_1$$

ist nicht zu erkennen, welche Marke p_1 (von den zwei möglichen) zum Schalten von t_1 genutzt wurde. Die Kommutativität der Struktur $(P^{\oplus}, \oplus, \mathbf{0})$ erlaubt keine Unterscheidung von Marken, sondern drückt nur ihre Multiplizität aus.

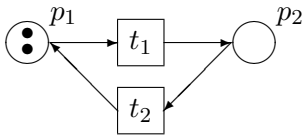


Abbildung 4.24: Ein Beispielnetz

Im Gegensatz dazu berücksichtigt die Prozess-Semantik auch die Historie der Marken. Betrachte das Netz in Abbildung 4.24: Eine Verlängerung des Prozesses aus Abbildung 4.25(a) kann an zwei verschiedenen Stellen stattfinden, da das Netz nicht 1-sicher ist.[9] Es ergeben sich die Prozesse in Abbildung 4.25(b) und (c). Prozesse unterscheiden die beiden Fortsetzungen, da beide Marken unterscheidbar sind (siehe Sassone, 1998; Bruni u. a., 1999). Betrachtet man die Prozessverlägerung als Sequenzoperator _ ; _ und Prozessnebenläufigkeit durch den Operator _ $\oplus$ _, so hat die Unterscheidbarkeit der Prozesse aus Abbildung 4.25(b) und (c) zur Folge, dass $\oplus$ kein kommutativer Operator sein kann (vgl. Sassone, 1998).

Die Prozesse eines Netzes sind Kausalnetze. Die abgeschwächte Form von Kausalnetzen sind Ereignisnetze (engl. „occurence nets“), die – im Gegensatz

[9] Die Stellen der Prozessnetze aus Abbildung 4.25 sind jeweils mit der Stelle des Netzes aus Abbildung 4.24 beschriftet, auf die sie abgebildet werden.

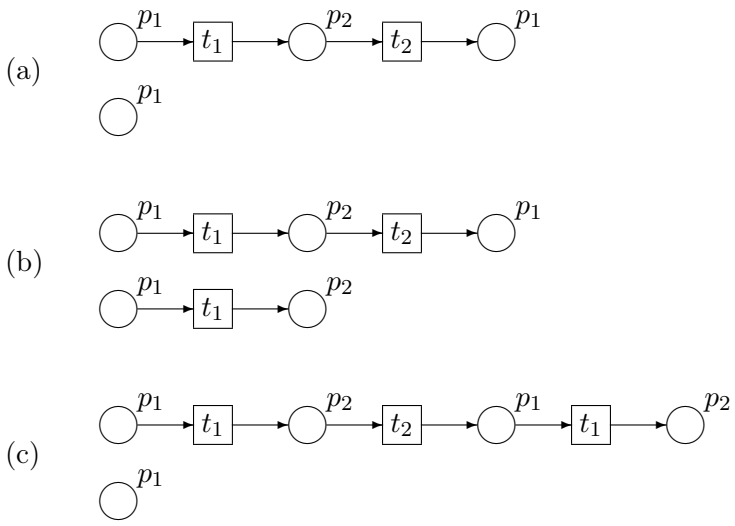


Abbildung 4.25: Prozesse: (a) Grundprozess,
(b) Verlängerung des Prozesses – erste Variante und
(c) Verlängerung des Prozesses – zweite Variante

zu Kausalnetzen – noch vorwärtsverzweigende Stellen erlauben, beispielsweise um Systemkonflikte in Prozessen (engl. „branching processes“) darzustellen (vgl. Engelfriet, 1991).

Definition 4.15 *Ein Petrinetz $N = (B, E, F)$ heißt* Ereignisnetz*, gdw. der transitive Abschluss F^+ azyklisch ist und für alle $b \in B$ auch $|{}^\bullet b| \leq 1$ gilt. Gilt zusätzlich noch $|b^\bullet| \leq 1$, so ist N ein* Kausalnetz*.*

Für ein Ereignisnetz $N = (B, E, F)$ definiere die Ordnungen $<, \leq \subseteq (B \cup E)^2$ durch $<:= F^+$ und $\leq:= F^*$. Die Menge der Vorgänger eines Elements $y \in B \cup E$ ist $\downarrow y := (_ < y) := \{x \mid x < y\}$. Das Ereignisnetz N heißt *vorgänger-endlich*, wenn für jedes $b \in B$ die Vorgängermenge $(_ < y)$ endlich ist.

Da ein Ereignisnetz vorwärtsverzweigt, können Netzelemente in Konflikt stehen, nämlich dann, wenn eine Stelle $b \in B$ existiert, von der zwei Konfliktereignisse $e_1, e_2 \in b^\bullet$ ausgehen. Dies wird durch die symmetrische *Konfliktrelation* $\# \subseteq (B \cup E)^2$ beschrieben:

$$x \# y \iff \exists b \in B : \exists e_1, e_2 \in b^\bullet : e_1 \neq e_2 \wedge e_1 \leq x \wedge e_2 \leq y$$

Kausalnetze sind demnach immer konfliktfrei: $\# = \emptyset$.

Sei $R \subseteq A \times A$ eine symmetrische, reflexive Relation. $K \subseteq A$ heißt *Klique* bezüglich R, gdw. alle Elemente in Relation stehen, d.h. für alle $x, y \in K$ gilt $x \; R \; y$. Eine maximale Klique heißt *Bezirk*. Die Menge aller Bezirke von R wird durch $\textsc{Bez}(R)$ notiert. Die symmetrischen und reflexiven Relationen **li** und **co** sind definiert als $\mathbf{li} := < \cup <^{-1} \cup id_A$ und $\mathbf{co} := \bar{\mathbf{li}} \cup id_A$. Die Menge der Bezirke bezüglich **li** werden als *Linien*, die Bezirke bezüglich **co** als *Schnitte* bezeichnet.

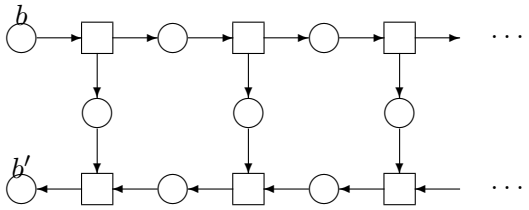


Abbildung 4.26: Ein unendlicher, nicht vorgängerendlicher Prozess

Nach Best und Merceron (1984) wird ein Prozess (engl. „run“) eines Netzes N definiert als ein Kausalnetz $R = (B, E, \lessdot)$ zusammen mit einem Abbildungspaar $\phi = (\phi_P : B \to P, \phi_T : E \to T)$. Diese Abbildung heißt *Faltung* (siehe dazu Abschnitt 4.3.2).

Kausalnetze, die einen Prozess eines P/T-Netzes darstellen sollen, müssen vorgänger-endlich sein, denn nur dann kann eine Bedingung in endlicher Zeit realisiert werden. Abbildung 4.26 zeigt einen nicht vorgänger-endliches Kausalnetz, da Beispielsweise b' unendlich viele Vorgänger besitzt. Ist der Prozesse R vorgänger-endlich, so kann er als Grenzwert endlicher Prozesse dargestellt werden.

Um die Darstellung zu vereinfachen, beschränken wir die folgende Darstellung auf T-schlichte, simple Netze. Sind die Netze T-schlicht, gilt ${}^\bullet t \neq \emptyset$, d.h. es werden keine Marken aus dem „Nichts“ erzeugte.

Die Erweiterung auf Multimengen der Abbildungen ϕ_P, ϕ_T setzen die beiden Strukturen in Verbindung zueinander, was durch die Kommutativitäten $\phi_P^{\oplus}({}^\bullet e) = \partial_0(\phi_T(e))$ und $\phi_P^{\oplus}(e^\bullet) = \partial_1(\phi_T(e))$ ausgedrückt wird, d.h. ϕ erhält die Umgebung der Transitionen.

Definition 4.16 *Sei $N = (P, T, F, W, \mathbf{m}_0)$ ein P/T-Netz, $R = (B, E, \lessdot)$ ein vorgängerendliches Ereignisnetz und ϕ ist ein Abbildungspaar aus $\phi_P : B \to P$ und $\phi_T : E \to T$, dann ist (R, ϕ) ein* Verzweigungsprozess *des Netzes N, falls die folgenden Eigenschaften gelten:*

1. *Die Stellen $^\circ R$ beschreiben $\mathbf{m}_0$: $\phi_P^{\oplus}(^\circ R) = \mathbf{m}_0$.*
2. *Die Prozessabbildung ϕ ist verträglich mit der Kantengewichtung:*

$$\phi_P^{\oplus}({}^\bullet e) = \partial_0(\phi_T(e)) \qquad \text{und} \qquad \phi_P^{\oplus}(e^\bullet) = \partial_1(\phi_T(e))$$

Ist R zudem noch ein Kausalnetz, so heißt (R, ϕ) ein Prozess *des Netzes N.*
Die Menge aller Verzweigegunsprozesse von N wird mit $BranProc(N)$ bezeichnet, Die Menge aller Prozesse mit $Proc(N)$.

Die Bedingung $\phi_P^{\oplus}(^\circ R) = \mathbf{m}_0$ ist mittels Multimengen formuliert. In mengentheoretischer Notation wäre eine äquivalente Formulierung: Die minimalen Elemente werden auf die Initialmarkierung abgebildet, d.h. $\phi(^\circ R) = \mathrm{dom}(\mathbf{m})$, und in der Einschränkung $\phi|_{^\circ R}$ auf minimale Elemente wird jede Stelle entsprechend ihrer Multiplizität $\mathbf{m}_0(p)$ abgebildet, d.h. $\phi|_{^\circ R}^{-1}(p) = \mathbf{m}_0(p)$.

Ist R ein Prozess, so muss R ein endlich verzweigendes Kausalnetz sein, denn $\partial_{0,1}(t)$ ist endlich für alle $t \in T$, also folgt aus $\phi_P^{\oplus}({}^\bullet e) = \partial_0(\phi_T(e))$ die Endlichkeit von ${}^\bullet e$ und aus $\phi_P^{\oplus}(e^\bullet) = \partial_1(\phi_T(e))$ die Endlichkeit von $e^\bullet$, insgesamt also die Verzweigungsendlichkeit im Kausalnetz.

Als Alternative zu Definition 4.16 kann ein Prozess (R, ϕ) auch durch eine Konstruktion erzeugt werden, die sich an den Schaltvorgängen im Netz N orientiert. Die Konstruktion erzeugt aus einem bestehenden Prozess induktiv einen weiteren, indem zum alten Prozessnetz – im Einklang mit dem Netz N – weitere Transitionen und Stellen hinzugefügt werden.

Damit beide Definitionen korrespondieren, ist für unendliche Prozesse nach Definition 4.16 die Eigenschaft der Vorgängerendlichkeit notwendig. Nach Goltz und Reisig (1983) ist jeder Prozess nach der algorithmischen Konstruktion auch ein Prozess im Sinne der Definition 4.16 – und umgekehrt.

Ist R ein Prozess, so kann eine Transition mit leerem Vorbereich, d.h. mit ${}^\bullet t = \emptyset$ nicht schalten, denn die Bedingung $\phi_P^{\oplus}(^\circ R) = \mathbf{m}_0$ impliziert $^\circ R \subseteq B$, d.h. es existieren keine vorbedingungsfreien Ereignisse. Somit reicht es, im folgenden nur Netze ${}^\bullet t \neq \emptyset$ für alle $t \in T$ zu betrachten. Aus Symmetriegründen fordern wir auch $t^\bullet \neq \emptyset$, d.h. wir beschränken uns auf T-schlichte Netze.

Prozesse sind ausdrucksstark genug, um Nebenläufigkeit von Permutierbarkeit zu unterscheiden. So besitzt das Netz N_1 aus Abbildung 4.21 den in Abbildung 4.27 (a) dargestellten Prozess, während das Netz N_2 aus Abbildung 4.22 die in Abbildung 4.27 (b) und (c) dargestellten Prozesse besitzt.[10]

Betrachtet man die Schnitte und Linien bezüglich **li** und **co**, die sich aus der Ordnung $<$ ergeben, so ist es sinnvoll, diese auf reine Stellen bzw. auf reine Transitionsmengen zu beschränken. Die Menge der P-Schnitte eines Prozesses R wird im folgenden durch $\mathcal{C}_R$ notiert. Insbesondere ergibt sich die Menge $\mathcal{C}_R$ aller Stellen-Schnitte, kurz: P-Schnitte, als die Menge der möglichen Markierungen eines Prozesses: Die Transitions-Schnitte, kurz: T-Schnitte, sind die nebenläufigen Transitionen.

Sei $(R, \phi) \in \mathit{Proc}(N)$ ein Prozess von N, dann ist jeder Stellenschnitt $C \in \mathcal{C}_R$ eine erreichbare Markierung: $\phi(C) \in RS(N)$.

Aktivierte Transition eines Petrinetzes können, müssen aber nicht schalten. Das Netz in Abbildung 4.28 erlaubt die Wiederholung der Aktionen a und b, d.h. $abababab\ldots$ ist eine aktivierte Schaltfolge. Für jeden Zustand, der während dieser Schaltfolge erreicht wird, ist die Transition c aktiviert, ohne je zu schalten. Um zu erzwingen, müssen wir die Fortschrittseigenschaft fordern.

Positiv formuliert bedeutet Fortschritt, dass eine dauerhaft aktivierte Transition auch schalten muss.

Definition 4.17 *Sei ein P/T-Netz N gegeben. Ein Prozess (R, ϕ) mit $R = (B, E, \prec)$ respektiert die* Fortschrittseigenschaft *(engl. progress) einer Teilmenge der Transition $T^p \subseteq T$, wenn der maximale Schnitt R° nur Transitionen aus $T \setminus T^p$ aktiviert:*

$$\forall Q \subseteq R^\circ : \exists t \in T : \phi(Q) = \partial_0(t) \Longrightarrow t \notin T^p$$

[10] Die Netzknoten sind mit dem Bild der Abbildung ϕ beschriftet.

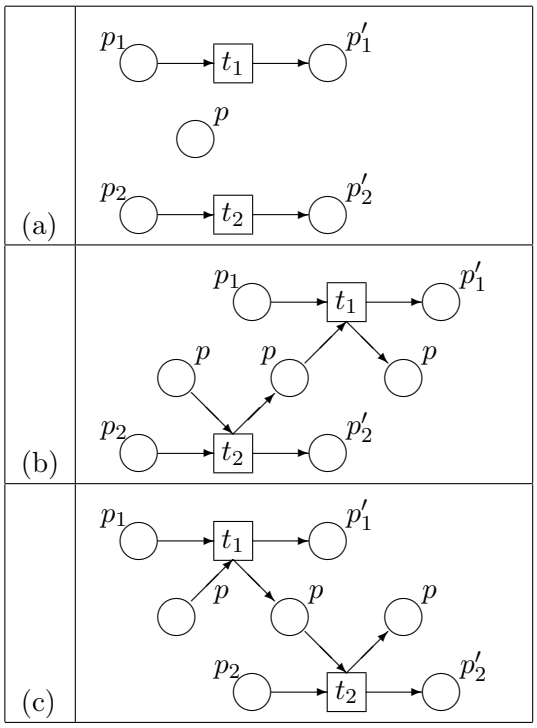


Abbildung 4.27: (a) Prozess des Netzes N_1 aus Abb. 4.21 sowie
(b) und (c) Prozesse des Netzes N_2 aus Abb. 4.22

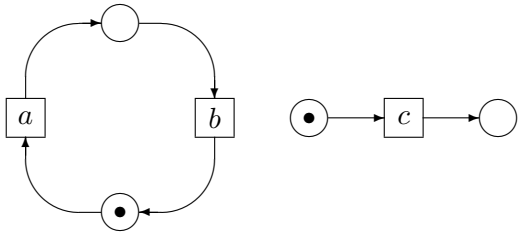


Abbildung 4.28: Zur Fortschrittseigenschaft

Wenn N ein lebendiges Netz ist und für alle Transitionen die Fortschrittseigenschaft gilt, dann sind alle Prozesse, welche die Fortschrittseigenschaft respektieren, unendlich.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir den Formalismus der Petrinetze eingeführt, und zwar in formaler Hinsicht als auch in seiner Bedeutung für die sozionische Modellierung. Wir haben zunächst vermittelnde Netze als sozionisch fundierte Darstellungstechnik kennengelernt, zusammen mit den Abstraktionsmechanismen der Verfeinerung und der Faltung. Formal haben wir Petrinetze als Modell für nebenläufige Prozesse studiert. Das Modell der Platz/Transition-Netze erweiterte das Modell um die Möglichkeit, mehrere Marken auf einer Stelle zuzulassen. Als Ausdruck der Nebenläufigkeit haben wir speziell Prozesse von Petrinetzen studiert.

5 Soziologische Einflüsse

Zum Gegenstandsbereich der Soziologie gehört alles, was Sozialität ausmacht. Sozialität bezeichnet den Zusammenhang von Handlungen einschließlich ihrer Bedingungen und Wirkungen und sozialen Strukturen. Als Gegenstand soziologischer Erklärungen wird somit hier die wechselseitige Konstitution von sozialem Handeln und sozialen Strukturen gesehen. Soziales Handeln wird durch soziale Strukturen geprägt.[1] Strukturen werden ihrerseits durch Handeln hervorgebracht. Es spielt dabei keine Rolle, ob dies intentional oder unbeabsichtigt geschieht. Strukturen entstehen nicht durch die einmalige Handlung eines einzelnen, sondern durch gleichartiges und unterschiedliches Handeln mehrerer Akteure. Diese sich *wechselseitig bedingende Beziehung zwischen Handeln und Strukturen* ist, wie gesagt, der allgemeine Gegenstand der Soziologie.

Nicht nur Aufbau und Veränderung sozialer Struktur ist dynamisch, sondern auch ihr Erhalt, denn auch die identische Reproduktion sozialer Strukturen muss aus den Dynamiken der jeweiligen Akteurkonstellation heraus erklärt werden. Auch und gerade die etabliertesten sozialen Strukturen erhalten sich nicht auf mysteriöse Weise, sondern nur über ein handelndes Zusammenwirken der involvierten Akteure. Das Konstellationsgleichgewicht beruht dann auf Kräften, die es verschieben und solchen, die es beibehalten wollen – also kein statisches, sondern ein dynamisches Gleichgewicht (vgl. Abb. 5.1).

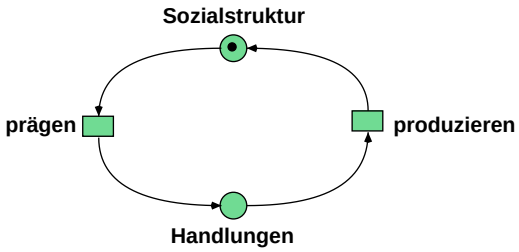


Abbildung 5.1: Wechselseitige Konstitution

Naiv betrachte mag die zyklische Verschränkung von Handlung und Struktur wenn nicht falsch, so doch zumindest irreführend erscheinend. Aus der zyklischen Verschränkung folgt natürlich keineswegs ein definitorischer Zirkelschluss – vielmehr ist zusätzlich die Prozessdimension der Beschreibung zu beachten. Es ergibt sich daher – berücksichtigt man die Dynamik – kein Zyklus, sondern eher eine Schraubenform: Die Sozialstruktur prägt Handlungen, die wiederum neue Sozialstrukturen produziert, die wiederum weitere Handlungen prägen usw.

[1] Die Psyche, die körperliche Verfassung und auch die Witterung spielen auch eine Rolle beim Handeln, als nicht-soziale Determinanten können sie aber nicht soziologisch erfasst werden.

Diese Dynamik entspricht exakt dem Schaltverhalten des Modells aus Abbildung 5.1. Die Bedingung Sozialstruktur ist markiert und aktiviert die Transition prägen. Nachdem die Transition prägen geschaltet hat, wird die Bedingung Handlungen markiert, wodurch die Transition prägen aktiviert ist, deren Schalten die Stelle Sozialstruktur erneut markiert usw. Der Prozess, der durch diese Schaltfolge beschreiben wird, ist selbst auch ein Netz, dargestellt in Abbildung 5.2.

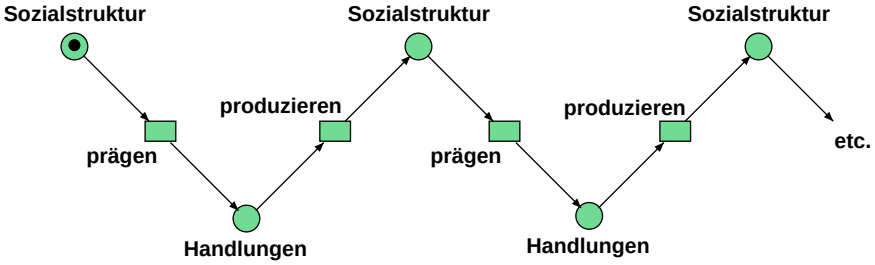


Abbildung 5.2: Iterative wechselseitige Bedingtheit

An dieser Stelle zeigt sich sehr schön, wie Petrinetze (wie das in Abbildung 5.1) den strukturellen Gehalt einer Aussage auffangen und gleichzeitig durch ihr Schaltverhalten (wie in Abbildung 5.2) die Prozessdynamik modellieren.

An dieser Stelle lohnt sich ein Vergleich der theoretischen Konzeption der wechselseitigen Konstitution von Handeln und Strukturen, die Schimank (2000) liefert, mit dem Konzept der Dualität von Struktur, wie Anthony Giddens es in (Giddens, 1984) entwickelt. Das Konzept der Dualität besagt, dass Strukturen eine zweifache soziale Funktion und Bedeutung haben: sie sind einerseits das Medium und andererseits das Ergebnis des Handelns (vgl. Abb. 5.3). Strukturen werden immer erst durch ihren Gebrauch, also durch Handlungen, manifestiert, produziert und reproduziert. Handeln hat nicht nur dann strukturelle Wirkungen, wenn es eine gegebene Struktur verändert oder eine aufbaut, wo vorher keine war. Auch das Gleichbleiben der Struktur über die Zeit ist Wirkung von Handlungen. Giddens nennt dies auch Rekursivität des Handelns und der Strukturen. Alle sozialen Strukturen lassen sich also auf soziales Handeln zurückführen. Sind sie aber erst einmal existent, beschränken und ermöglichen sie Anschlusshandlungen der Akteure. Das ist die mediale Funktion der Strukturen für Handlungen.

Abbildung 5.3: Strukturen als Medium und Ergebnis (Giddens)

Dieses Konzept begreift also Strukturen als das primäre Element, das sich reproduziert und durch dessen mediale Funktion die Handlungen der Akteure beschränkt und ermöglicht werden. Wir können uns nun fragen, wie das Modell

aus Abbildung 5.3 mit dem Modell der wechselseitigen Konstitution aus Abbildung 5.1 in Beziehung setzen lässt. Auch wenn die beiden Modelle zunächst unterschiedlich erscheinen, lässt sich das Modell aus Abbildung 5.1 mit einer einzigen Verschmelzung der beiden Stellen direkt in das Modell aus Abbildung 5.3 überführen. Mit anderen Worten: Beide Modelle beschreiben annähernd die gleiche Grundstruktur.

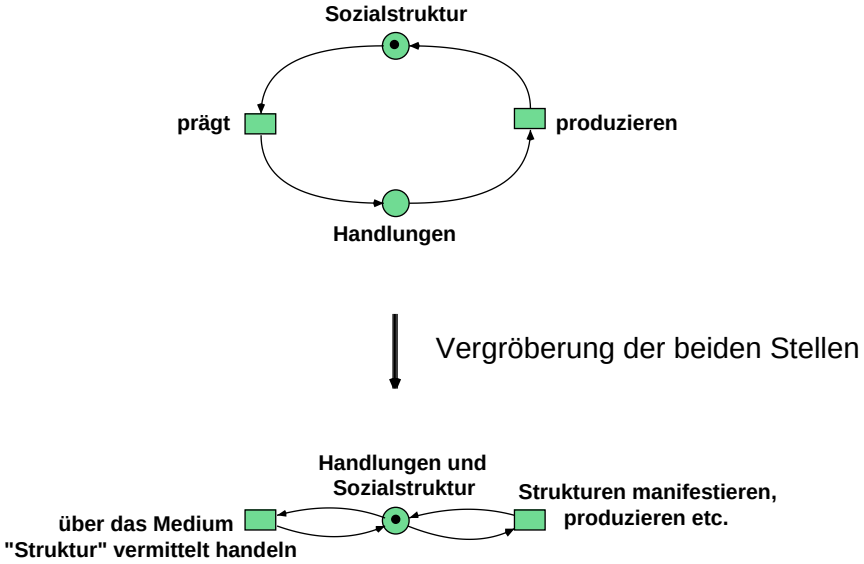


Abbildung 5.4: Bezug: Schimank vs. Giddens

5.1 Grundlinien soziologischer Theoriebildung

Die theoretischen Ansätze zur Modellierung des Sozialen, d.h. der Gesellschaft, ihrer Akteure usw., lassen sich grob in drei Kategorien einteilen. Die erste Gruppe der individualistischen Theorien stellt den handelnde Akteur in den Mittelpunkt der Betrachtung. Untersucht wird, wie soziale Akteure ihre Handlungen selektieren. Für die zweite Gruppe der intersubjektiven Theorien ist nicht der einzelne Akteur von Bedeutung, sondern die Interaktionsprozesse innerhalb einer Gruppe von Akteuren. Die dritte Kategorie setzt die sozialen Strukturen (Werte, Normen usw.) als zentrales Element der Theorie. Es wird untersucht, wie sich soziale Strukturen verändern und welchen Einfluß sie auf soziale Handlungen haben.

5.1.1 Der Individualismus

Der individualistische Ansatz (auch: methodologischer Individualismus) stellt das Individuum ins Zentrum der Theorie, da er den Standpunkt vertritt, das alle soziale Aussagen letztlich auf die Handlungen von Akteuren rückführbar sind. Der methodologische Individualismus basiert auf zwei Wurzeln: Zum einen auf

der ethisch-ökonomischen Lehre des Utilitarismus, zum anderen auf der psychologischen Theorie des Behavorismus.

Die auf Jeremy Bentham (1748-1832) und John Stuart Mill (1806-1873) zurückgehende Theorie des Utilitarimus besagt, dass eine Handlung dann rechtens ist, wenn sie das eigene Wohl und das Allgemeinwohl steigert. Eng mit dieser ethischen Kategorie ist die ökonomische verbunden, die sich auf die Gedanken von Adam Smith (1723-1790) und David Ricardo (1772-1823) stützt, nach denen die „unsichtbare Hand des Marktes“ von alleine für einen Ausgleich zwischen egoistischen Akteuren sorgt.

Der Behaviorismus geht auf John Broadus Watson (1778-1858) zurück. Er reduziert seine Analyse auf beobachtbare Daten, insbesondere auf Reiz/Reaktions-Versuche, und lehnt nicht meßbare Verfahren ab. Behaviorismus war der naturwissenschaftliche Gegenentwurf zur Gestalttheorie und zur Psychoanalyse. Watson verbannte daher Konzepte wie introspektive Konzepte wie Bewußtsein, Denken, Fühlen o.ä. aus seiner Theorie. Handlungen werden durch äußere Reize aus der Umwelt und die interne Verarbeitung durch biologische Prozesse erklärt. Die Arbeit wurde in der Theorie der konditionierten Reflexe nach Ivan Petrovich Pavlov (1849-1936) und in der Lerntheorie nach Burrhus Frederic Skinner (1904-1990) fortgesetzt.

Georg Caspar Homans (1910-1989) entwickelte ausgehend vom Behaviorismus eine Theorie des sozialen Handelns. Homans versteht seinen Ansatz, der das Individuum in das Zentrum rückt, auch als Gegenentwurf zum Strukturfunktionalismus Talcott Parsons (1902-1979).[2] Die von Homans formulierte Handlungstheorie geht davon aus, dass soziale Handlungen Austauschbeziehhungen sind. Personen tauschen bei ihren Aktionen sowohl materielle Güter, wie beispielsweise Naturalien, als auch immaterielle, wie beispielsweise Anerkennung oder Prestige. Die dem Utilitarismus entlehnte These lautet, dass Menschen so handeln, dass sie ihre persönliche Kosten/Nutzen-Bilanz optimieren. Dieses Akteursmodell des homo oeconomicus geht davon aus, dass der Gewinn sowohl absolut als auch relativ zu den Gewinnen anderer maximiert werden soll. Das menschliche soziale Zusammenleben ist also von marktwirtschaftliche Konkurenz geprägt. Kooperatives Verhalten ist möglich, aber nur, wenn die Zusammenarbeit größere Gewinne verspricht, als sie konkurrierend erreichbar wären.

Eine Relativierung des Konzeptes des homo oeconomicus hin zu einer verstärkten Betrachtung von Makrostrukturen wird im Rational-Choice-Ansatz vorgenommen. Die Rational-Choice-Theorie, maßgeblich von James Coleman (1926-1995) entwickelt, nimmt an, dass die Handlungen eines Akteurs durch die soziale Situation gerahmt werden (Stichwort: Logik der Situation) und das Handlungen Makrophänomene in Form nicht-intendierter Effekte erzeugen können (Stichwort: Logik der Aggregation). Die rationale Handlungswahl ist also an die sozialen Makrostrukturen gekoppelt; Akteure sind in soziale Strukturen eingebunden, mit ihnen verflochten.

Dieses Modell ist von dem deutschen Hauptvertreter des Rational-Choice-

[2] Damit ist der humanistische Wunsch verbunden, den Menschen und nicht abstrakte Strukturen zu erforschen. Gleichzeitig ist das Forschungsprogramm aber auch eine Gegenposition zur der sich an Strukturen orientierenden sozialistischen/kommunistischen Theorie.

Ansatzes, Hartmut Esser, im „Badewannemodell“ zusammengefasst worden (vgl. Abbildung 5.5). Die soziale Situation S legt durch die *Logik der Situation* die Handlungsoptionen des Akteurs A fest. Dieser wählt anhand der *Logik der Selektion* seine Handlung H aus. Diese Handlungen haben gemäß der *Logik der Situation* Auswirkungen auf die soziale Struktur, so dass sich als Nebeneffekt des Handelns die Struktur S zu S' verändert. Mit dieser Gedankenfigur reduziert der methodologische Individudalismus letztlich jede Form sozialer Erscheinungen auf Akteurshandlungen.

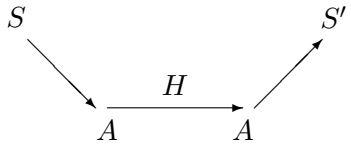


Abbildung 5.5: Das Badewannenmodell

Um soziales Handeln vom bloßen Verhalten abzugrenzen, definiert Max Weber[3] Handeln als Verhalten, mit dem der Handelnde einen subjektiven Sinn verbindet (vgl. Weber, 1922, 2). Handeln ist demnach eine Sonderform von Verhalten (vgl. Abb. 5.6).

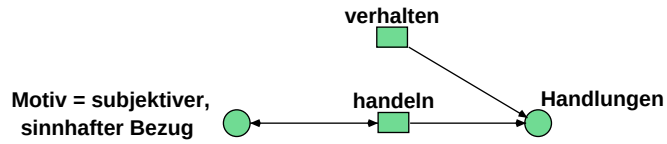


Abbildung 5.6: Verhalten vs. Handeln

Als „ein körperliches Geschehen in Raum und Zeit“ (Luckmann, 1992, 38) können sowohl Tier als auch Mensch sich verhalten. *Verhalten* ist zurückführbar auf physikalische, chemische und biologische Faktoren. Das meiste Verhalten ist soziologisch unerheblich, weil es keinen Effekt auf Sozialstrukturen zeitigt – wie das Heben des Arms, um sich nach langem Sitzen zu strecken. Ein Arm kann aber auch gehoben werden, um jemanden zu warnen oder zu bedrohen. Ein solches Motiv wäre dann der subjektiv sinnhafte Bezug des rein körperlichen Geschehens – man spricht vom *Handeln*. Handeln ist motiviert und hängt mit dem bewussten Erleben seiner selbst und der Außenwelt zusammen. Wenn man das Erlebte zueinander in Beziehung setzt und zu Erfahrungen verdichtet (vgl. Abb. 5.7), konstituiert sich Sinn (vgl. Luhmann, 1971, 1984, 92-147).[4]

[3] Maximilian Carl Emil Weber (* 21. April 1864 in Erfurt; 14. Juni 1920 in München), Jurist, Nationalökonom und Soziologe.

[4] Sinnzuweisungen können in die Vergangenheit oder in die Zukunft gerichtet sein: ich führe mein momentanes berufliches Scheitern auf vergangene Faulheit zurück; ich entscheide mich dafür, Informatik zu studieren, weil ich mir davon später Erfahrungen und Erlebnisse von beruflichem Erfolg und hohem Einkommen erhoffe.

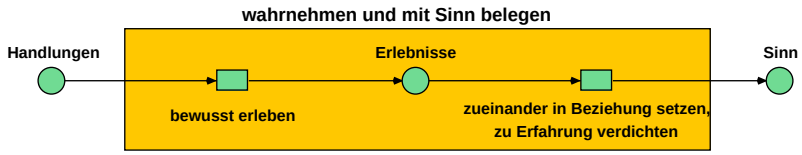


Abbildung 5.7: Konstitution von Sinn

5.1.2 Der intersubjektiver Ansatz

Der intersubjektive Ansatz beschäftigt sich mit den Interaktionsprozessen der Akteure, weniger mit den Akteuren selbst. Eine der Grundprämissen dieses Ansatzes ist, dass Handlungen keinen objektiven Sinn besitzen, sondern stets interpretiert werden müssen. Die gleiche Mitteilung kann in Abhängigkeit des Kontextes, des Äußernden, des Hörenden etc. unterschiedlich interpretiert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang vom *interpretativem Paradigma*.

Soziales Handeln ist daher subjektiv und situationsbezogen. Der Sinn einzelner Handlungen existiert nicht objektiv, sondern erschließt sich teils erst im Laufe des Interaktionsprozesses. Der subjektive Sinn *sozialen Handelns* stellt das vergangene, gegenwärtige und zukünftige Handeln anderer Akteure in Rechnung (vgl. Weber, 1922), und zwar (a) um einen bestimmten Zustand beim anderen herbeizuführen oder (b) weil ich das Handeln des anderen als störend oder unterstützend einkalkulieren muss. Handeln kann einseitig oder wechselseitig aufeinander bezogen sein.

Das interpretative Paradigma[5] ist eng mit der Sozialpsychologie Meads verbunden. George Herbert Meads (1863-1931) begreift den Menschen, im Gegensatz zum Tier, als ein symbolisch kommunizierendes Wesen, wobei Sprache im Vordergrund der Kommunikationsmöglichkeiten steht. Interaktionsprozesse sind nach Mead möglich, weil der Mensch in der Lage ist, in die Rolle seines Gegenübers zu schlüpfen (der sogenannte „generalisierte andere“) und die eigenen Handlungen in bezug auf die des Gegenübers abzustimmen.

Mead interessiert sich daher weniger für die Motive des einzelnen Akteurs, sondern auf die Handlungsprozesse zwischen Akteuren. Sein Interesse gilt dem Ganzen, den gesellschaftlichen Prozessen, und nicht den Teilen, den Akteuren.[6] Mead ging sogar davon aus, dass die Identität des Menschen nur als Ergebnis sozialer Prozesse existiert und ihr nicht vorgelagert ist.

Wechselseitiges soziales Handeln konstituiert eine *soziale Beziehung*. Diese kann einmaligen, sporadischen oder dauerhaften Charakter haben. Die Akteure einer sozialen Beziehung teilen relativ stabile komplementäre Erwartungen aneinander[7]: Der andere verhält sich – so erwarte ich – gemäß meiner Erwartungen und umgekehrt. Auf diese Weise ist es möglich, das eigene Handeln auf

[5] Das interpretative Paradigma ist auch unter der Bezeichnung *symbolischer Interaktionismus* bekannt. Diese Bezeichnung wurde von Herbert Blumer (1900-1987), einem Schüler Meads, geprägt.

[6] Auch wenn der symbolische Interaktionismus zu einer Subjekt-bezogenen, mikrosoziologischen Theorie weiterentwickelt wurde.

[7] Zu Erwartungstypen siehe (Luhmann, 1972, 40-53)

Gewissheiten über das Handeln des anderen zu gründen. Handelndes Zusammenwirken findet statt – oder: Sozialität wird als *Intersubjektivität* konstituiert. Sozialität ist das, was passiert, wenn ein Subjekt ins Wahrnehmungs- und Relevanzfeld eines anderen gerät und mit Sinn belegt wird (vgl. dazu Abb. 5.7). Diese wechselseitige Konstitution fasst das Thomas-Theorem[8] zusammen. Es besagt, dass soziale Wirklichkeit nicht objektiv existiert, sondern sich nur aus dem interpretierenden und wechselseitig aneinander orientierten Handeln ergibt.

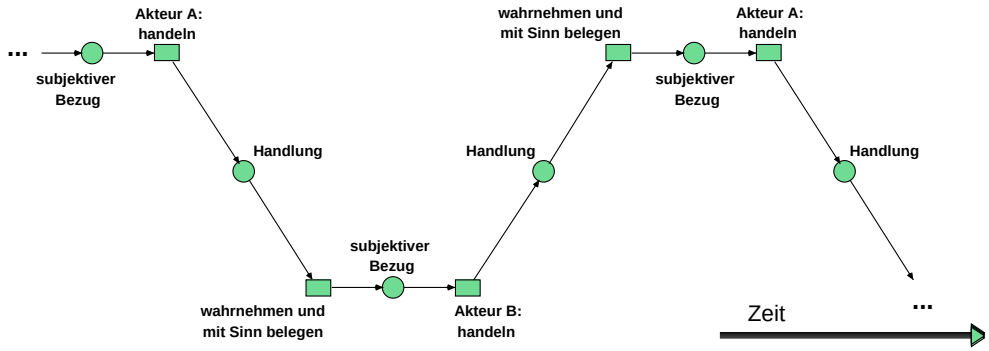


Abbildung 5.8: Wechselseitiges soziales Handeln (als Prozess dargestellt)

Eine solche wechselseitige Wahrnehmung lässt sich gut sowohl als Prozess als auch als Struktur visualisieren. In Abb. 5.8 ist der Prozess der Wahrnehmung in der wechselseitigen sinnhaften Bezugnahme zweier Akteure aufeinander dargestellt. In Abb. 5.9 ist die korrespondierende Struktur visualisiert, die sich als Faltung des Prozesses ergibt.

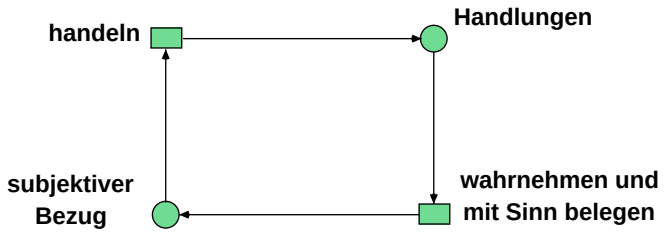


Abbildung 5.9: Wechselseitiges soziales Handeln (als Struktur dargestellt)

5.1.3 Der objektive Ansatz

Der objektive Ansatz stellt die Makrostrukturen, wie beispielsweise Institutionen, Organisationen, Klassen oder Normsysteme, ins Zentrum der Betrachtung. Die Gesellschaft in ihren sozialen, ökonomischen und kulturellen Dimensionen ist als Gegenstand an sich zu analysieren, da sie objektiv ist, d.h. eine eigene, von den Akteuren losgelöste Realität besitzt.

[8] William Isaac Thomas (1863-1947)

Zu den bekanntesten Strömungen innerhalb der Makrotheorie zählen der Funktionalismus, der Strukturalismus sowie die soziologische Systemtheorie.

Der *Funktionalismus* ist eng mit den Arbeiten Émile Durkheims[9] verbunden. Durkheim untersuchte die funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Individuen in arbeitsteiligen Gesellschaften in Hinblick auf die strukturellen Randbedingungen, die Arbeitsteilung ermöglichen (wie beispielsweise Verträge).

Der *Strukturalismus* postuliert, dass unterschiedliche Phänomene nicht isoliert auftreten, sondern in Verbindung mit anderen Phänomenen stehen. Diese Verbindungen bilden die Tiefenstruktur der Phänomene. Das bekannteste Bild dafür ist das der Grammatik, das jedem Phänomen, d.h. jedem Satz einer Sprache, seine Tiefenstruktur, d.h. die syntaktische, regelbasierte Ableitung in Subjekt, Prädikat usw., zuordnet. Der Strukturalismus geht auf den Genfer Sprachwissenschaftler Ferdinand de Saussure zurück, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts Vorlesungen über Allgemeine Sprachwissenschaft hielt. In der Soziologie ist der begriff des Strukturalismus eng mit dem Namen Claude Lévi-Strauss (geb. 1908) verbunden. Der Ethnologe Lévi-Strauss untersuchte in seinen anthropologischen Studien die innere Ordnung. So fand er bei einem Vergleich verschiedener Mythen Nord- und Südamerikas universelle, immer wieder vorkommende Geschichten. In seiner Analyse von Verwandtschaftssystemen belegte er anhand zahlreicher Beispiele, dass die Struktuenr aller Heiratssysteme vom einem universellen Inzesttabu bestimmt werden.

Zentraler Begriff der funktionalistischen bzw. strukturalistischen Theorie ist die Grundannahme, dass Komplexität die zentrale Qualität sozialer Systeme ist. Da Komplexität Handeln be-, wenn nicht gar verhindert, besteht die Notwendigkeit zur Reduktion von Komplexität. Eng mit der Reduktion von Komplexität ist die funktionale Ausdifferenzierung von Systemen zu sehen. Die Reduktion von Komplexität ist somit durch ein erhöhtes Maß an Abhängigkeit erkauft.

Die beiden bekanntesten Vertreter der *Systemtheorie* sind Talcott Parsons (1902-1979) und Niklas Luhmann (1927-1998) Luhmann grenzt sich explizit von Parsons ab, indem er seinen Ansatz als funktional-strukturalistisch bezeichnet, im Gegensatz zu Parsons' struktur-funktionalistischen Ansatz. Der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen wird in der Forschungsperspektive, die beide jeweils auf den Gegenstand des sozialen Systems einnehmen, deutlich. Für Parson steht die Beziehung des Systems zu seinen Subsystemen (das Verhältnis des Ganzen zu seinen Teilen im Vordergrund, für Luhmann die Beziehung des Systems zu seiner Umwelt. Parsons analysiert das Zusammenwirken der Systemteile; Luhmann untersucht, wie ein System sich selbst durch Grenzziehung definiert.

Die späteren Arbeiten Luhmanns greifen dann noch die Konzepte der Selbstreferenz, der Autopoiese und der operationalen Geschlossenheit auf (vgl. dazu auch Kapitel 2.) Soziale Systeme bestehen für ihn aus selbstreferentiellen Kommunikationsprozessen. Diese Kommunikationsprozesse sind zudem noch operationell geschlossen, d.h. nur der Kommunikationsprozess ist all einziger in der

[9] David Émile Durkheim (* 15. April 1858 in Épinal, Frankreich; †15. November 1917 in Paris). Franzöischer Soziologe. Er gilt als einer der Begründer der Soziologie als empirische Wissenschaft mit eigenständiger Methode.

Lage, auf das Kommunikationssystem Einfluß zu nehmen. Hier zeigt sich auch die weitesgehende Loslösung von der Mikroebene, denn die Individuen sind gerade kein Bestandteil des sozialen Systems, sondern gehören vielmehr zur seiner Umwelt. Durch diese Modellierung besitzen soziale Systeme dann die Fähigkeit zu Autopoiese, d.h. sie reproduzieren sich aus eigener Dynamik heraus selbst.[10]

Betrachten wir die drei Perspektiven – Individualismus, Intersubjektive Konstruktion und objektivierte Sozialität – im folgenden genauer.

5.2 Individualismus: Akteursmodelle[11]

Um zu einer Erklärung zu gelangen, warum jemand auf eine bestimmte Weise (und nicht anders) handelt, muss man sich die Menge und Verschiedenheit der Strukturelemente vergegenwärtigen, die auf einen Handelnden in einer bestimmte Situation wirken. Alle Strukturelemente in ihren jeweiligen Ausprägungen schränken teilweise die Handlungsmöglichkeiten des Akteurs ein, teilweise erweitern sie sie. Dabei überlagern sie sich wie in Abbildung 5.10 vielfach.

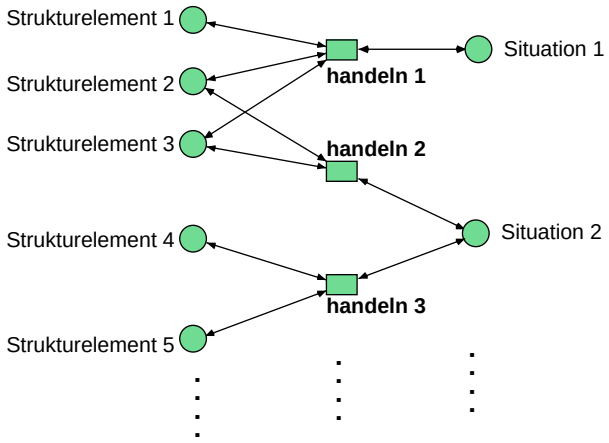


Abbildung 5.10: Verknüpfung von Strukturelementen durch die Situation

Zu analytischen Zwecken muss eine selektive Hervorhebung derjenigen Strukturelemente erfolgen, denen man beim jeweils zu erklärenden spezifischen Handeln einen überwiegenden Einfluss zuschreibt. Akteursmodelle legen die relevanten Elemente der Sozialstruktur und ihre Wirkungsweisen fest. Zur Bearbeitung dieses Themenkomplexes sollen vier soziologische Akteurmodelle herangezogen werden: Der Homo Sociologicus ist ist das bekannteste Akteurmodell der Soziologie: Ein Akteur, der sich in seinem Handeln an sozialen Normen orientiert Der Homo Oeconomicus stammt ursprünglich aus den Wirtschaftswissenschaften und hielt besonders in den letzten Jahren verstärkt Einzug in die Soziologie.

[10] Würden Individuen neben Kommunikationsprozessen Bestandteil sozialer Systeme sein, so wären diese nicht mehr autopoietisch, denn Menschen sind nicht auf Basis von Kommunikationsprozessen reproduzierbar.

[11] Dieser Abschnitt basiert auf der gemeinsamen Arbeit mit meiner Kollegin Daniela Spresny und stellt eine Überarbeitung von (Köhler u. a., 2003e) dar.

Der Akteur gilt hier als strategischer Nutzenmaximierer. Der Emotional Man gehört zur Zeit noch nicht zu den geläufigen Modellen in der Soziologie: Der Akteur wird in seinem Handeln von Neid, Wut, Liebe, Freude usw. geleitet. Der Identitätsbehaupter wurde in Goffmans Studien entworfen: Er handelt bezogen auf seine Selbstdarstellung gegenüber anderen Akteuren. Mit Hilfe der Akteurmodelle lassen sich sowohl Handlungswahlen als auch deren strukturelle Bedingtheit nachvollziehen und erklären.

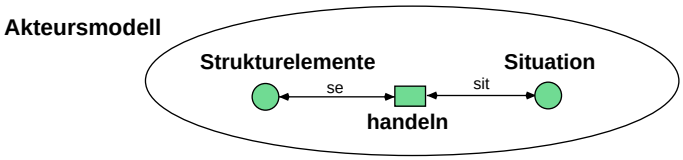


Abbildung 5.11: Faltung der Gesamtheit aller Handlungen

Die vier Akteurmodelle der nächsten Unterkapitel heben unterschiedliche Strukturelemente als bestimmend für die Auswahl der Handlung eines Akteurs hervor. Dies wird bedingt durch die spezifische Situation, in der sich ein Akteur gerade befindet (vgl. Abb. 5.10). Die Einzelhandlungen sind als Ausprägungen des gleichen strukturellen Phänomens zu sehen: immer leiten Strukturelemente und Handlungssituationen das Handeln an. Die Strukturgleichheit von Handlungen wird in Petrinetzen durch eine *Faltung* beschrieben: Die Ausprägungen der Strukturelemente – $\text{Strukturelemente}_1$, $\text{Strukturelemente}_2$ usw. – werden zu einer Stelle zusammengefasst, ebenso die Handlungen und die Situationen. Das Ergebnis der Faltung ist in Abb. 5.11 dargestellt. Damit die Transition handeln den gleichen Bezug zu den Stellen Strukturelemente und Situation besitzt, ist es notwendig, Variablen einzuführen: Für die Strukturelemente ist dies die Variable se und für die Situation ist es die Variable sit. Die Belegung der Variablen mit Werten wird durch Schaltprädikate (in der Abbildung 5.11 nicht dargestellt) so eingeschränkt, dass das Netz in Abb. 5.11 genau die Handlungen aus Abb. 5.10 beschreibt.

Im folgenden werden die vier Akteurmodelle (Homo Sociologicus, Homo Oeconomicus, Emotional Man und Identitätsbehaupter) beschrieben und mittels vermittelnder Petrinetze modelliert. Die Akteurmodelle beschreiben grundlegende Handlungsantriebe für strukturell eingebettetes Handeln der Akteure. Sowohl soziologisch als auch informatisch sind vor allem solche Strukturelemente von Interesse, die das Handeln bestimmen oder dominieren.

5.2.1 Der Homo Sociologicus: Normorientiertes Handeln

Der Homo Sociologicus ist das Akteurmodell, das sich spätestens seit dem gleichnamigen Aufsatz von Ralf Dahrendorf (Dahrendorf, 1958) innerhalb der Soziologie der größten Popularität erfreut. Der dem rollentheoretisch begründeten Modell zugrunde liegende Handlungsantrieb ist die Orientierung an sozialen Normen bzw. Erwartungen.

Nach Emile Durkheim lassen sich in der sozialen Welt Regelmäßigkeiten des

Handelns feststellen und als Normen identifizieren, die das Handeln von Akteuren in bestimmte Bahnen lenken. Diese Normen werden mit der Erziehung vermittelt (vgl. Durkheim, 1885). Durkheim vertritt die Auffassung, dass der einzelne Akteur sein Handeln allein an sozialen Normen orientiert. Andere denkbare subjektive Handlungsorientierungen bleiben in seiner Sichtweise unberücksichtigt (vgl. hierzu Abbildung 5.12).

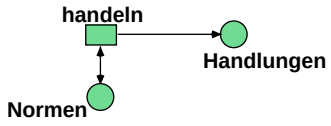


Abbildung 5.12: Orientierung an sozialen Normen

Talcott Parsons Theorie ebenfalls die dominierende gesellschaftliche Wirksamkeit sozialer Normen, aber in einer von Durkheim abweichenden Ausrichtung. Parsons entwickelt einen Bezugsrahmen für Handlungen („action frame of reference“), der über Durkheims Auffassung hinaus geht, sich aber gleichzeitig auch gegen die Konzeption rationaler Wahlhandlungen abgrenzt (vgl. Parsons, 1937). Die Analyseeinheit seiner Handlungstheorie, der sogenannte *unit act*, enthält folgende Bedingungen und Möglichkeiten des Handelns: 1. den Akteur als handlungsfähiges Wesen, 2. Ziele und Absichten, die ein Akteur verfolgt (Intentionalität), 3. die Situation, die den Akteur einerseits beschränkt und ihm andererseits Handlungsmittel an die Hand gibt, und 4. die normative Regulierung des Handelns durch die Orientierung an anderen (vgl. dazu Abbildung 5.13).[12]

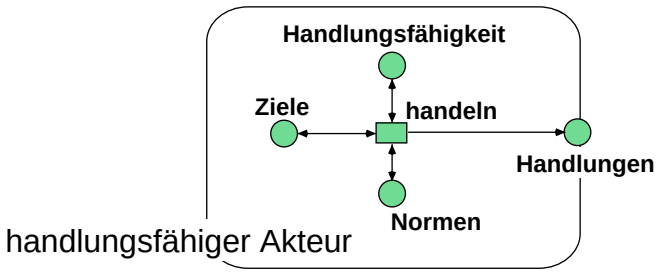


Abbildung 5.13: Der *unit act*

Parsons differenziert entsprechend vier analytische Komponenten der Sozialität aus, die im Handeln zusammenspielen: der Verhaltensorganismus (körperliche Bedürfnisse wie Hunger drängen zum Handeln; körperliche Fähigkeiten wie die Sehfähigkeit und die Motorik stellen Handlungsmittel), die Persönlichkeit (Motive des Handelns entstehen aus persönlichen Bedürfnissen und Vorlieben), die soziale Normen, die nicht alles, was motivational gewollt wird, auch zulassen

[12] In Parsons' Sicht stellt sich das Handeln als das Zusammenwirken von zwei Determinationspolen dar: auf der einen Seite der Pol der bedingenden Faktoren für den Möglichkeitsspielraum des Akteurs; auf der anderen Seite der Pol der normativen Faktoren dafür, welche Möglichkeiten in Betracht kommen und welche gewählt werden.

sowie die kulturelle Orientierung, die soziale Normen zu generalisierten Mustern zusammenfügen. All diese Komponenten zusammen bilden eine Art Trichter der Handlungsselektion.

Strukturfunktionalistisches Paradigma: Rollenhandeln

Das normative Paradigma wurde in der *strukturfunktionalistischen Rollentheorie* weiter ausgearbeitet. Dieser Ansatz betrachtet soziales Handeln als *Rollenhandeln*. Bei vielen Handlungsvollzügen sind die *Ausführenden austauschbar*, so lange und weil ihr Handeln sich an den normativen Erwartungen orientiert bzw. geprägt wird, die ihnen entgegen gebracht werden.

Sozialität stellt sich z.B. nach Dahrendorfs Kritik der strukturfunktionalistischen Rollentheorie als *Gefüge sozialer Positionen* dar. Soziale Positionen sind Knotenpunkte in einem Netz sozialer Beziehungen. Jede Person nimmt viele Positionen ein, aber nicht alle gleichzeitig[13]. Jede Position ist mit einer Rolle verbunden. In Rollen bündeln sich Erwartungen der Gesellschaft an den Rollenträger.[14]

Je höher die Verbindlichkeit der Erwartungen ist und / oder je stärker die Rollenerwartungen internalisiert sind, desto voraussagbarer ist das Rollenhandeln.

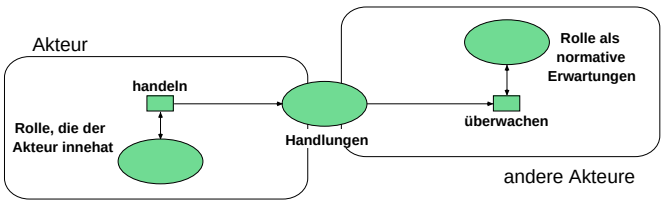


Abbildung 5.14: Rollen als internalisierte und überwachte Sozialstruktur

Soziale Normen orientieren die Handlungswahl also, indem die Gestalt von Rollenerwartungen an soziale Positionen adressiert werden. Personen haben mehrere Rollen inne, die als Rollen-Set durch die Gesamtheit der jeweiligen Bezugsgruppen instruiert, überwacht und sanktioniert werden (vgl. Merton, 1957). Die Kombination beider Formen der Rollenerwartungen zeigt Abbildung 5.14: der linke Hälfte der Abbildung stellt Rollen in der internaliserten Form dar, die rechte Hälfte stellt sie in ihrer zu überwachenden Form dar. Die Sozialwelt ist dann strukturell gesehen ein immens großer Zusammenhang einander wechselseitig bestimmender Positionen – oder: eine komplexe Erwartungsverflechtung.

Mit dem analytischen Modell des Homo Sociologicus lassen sich in der sozialen Wirklichkeit beobachtbare Phänomene angemessen erfassen. Es bildet

[13] Ehemann, Vater, Lehrer, Kollege, Vereinsmitglied...

[14] Dahrendorf unterscheidet drei Arten von Rollenerwartungen: Muss-Erwartungen (hochgradig verbindlich, oft rechtlich fixiert, sanktioniert), Soll-Erwartungen (schwächerer Verbindlichkeitsgrad, mildere Sanktionen) und Kann-Erwartungen (geringe Verbindlichkeit, keine negativen Sanktionen bei Unterlassung – aber positive Sanktionen, wenn sie erfüllt werden).

theoretisch eine praktische Fiktion des sozial Handelnden nach. Jede Konformität mit Rollenerwartungen bestätigt dem Gegenüber die Angemessenheit seiner Erwartung und verstärkt sie. Mit dieser sozialen Dynamik wird der normative Erwartungszusammenhang als Struktur der Sozialwelt reproduziert.

Die auf individuelle Akteure beschränkte Rollentheorie kann auf *kollektive* (z.B. soziale Bewegungen) und *korporative Akteure* (z.B. formale Organisationen) erweitert werden. Denn in der Rollentheorie sind nicht nur Personen handlungsfähig, sondern unter Umständen auch Organisationen, und das bedeutet mehr als das Handeln der individuellen Mitglieder dieses korporativen Akteurs.

Interpretatives Paradigma: „role making“

Das *interpretative Paradigma* stellt wesentliche Voraussetzungen der Rollentheorie in Frage, z.B. dass Rollen und Erwartungen umstandslos von den Akteuren übernommen und ausgefüllt werden (engl. *role taking*). Es proklamiert, dass der Akteur seine Rollen auch durch kreative Eigenleistungen ausgestaltet (engl. *role making*).

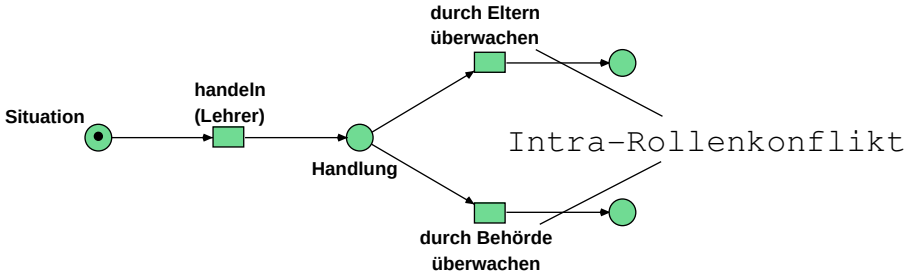


Abbildung 5.15: Intra-Rollenkonflikt

Wenn die Erwartungen verschiedener Bezugsgruppen bezüglich einer Rolle nicht vereinbar sind, sondern Widersprüchliches verlangen, liegt ein *Intra-Rollenkonflikt* vor (vgl. Abb. 5.15). Beispielhaft ist hier der Rollenkonflikt eines Lehrers abgebildet, an den widersprüchliche Erwartungen seitens der Eltern und der Schulbehörde herangetragen werden. Um diesen Konflikt aufzulösen kann der Lehrer sich nun an der Stärke des Erwartungsdrucks orientieren, also sich der einflussreicheren Bezugsgruppe beugen. Auch das Ausmaß der Beobachtbarkeit von Erwartungskonformität kann den Umgang mit Intra-Rollenkonflikten bestimmen. Oder er kann sich nach der Gruppe richten, die ihn am besten kontrollieren kann (vgl. Abb. 5.16). Denkbar ist auch der Versuch, seine Abweichung vor der anderen Gruppe zu verstecken oder Erwartungskonformität vorzuspielen (vgl. Goffman, 1956). Eine offensive Strategie wäre, über die konfligierenden Erwartungen offen zu verhandeln, auf Verständnis zu hoffen oder gar die Gruppen gegeneinander auszuspielen. Er betriebe damit *role making*.

Wenn die Erwartungen unterschiedlicher Rollen nicht miteinander vereinbar sind, liegt ein *Inter-Rollenkonflikt* vor. In Abb. 5.17 ist ein solcher Konflikt abgebildet. Der Sozialkundelehrer ist gleichzeitig Mitglied in einer politischen Partei. Vom Lehrer wird erwartet, dass er den Schülern politisch neutral Inhalte

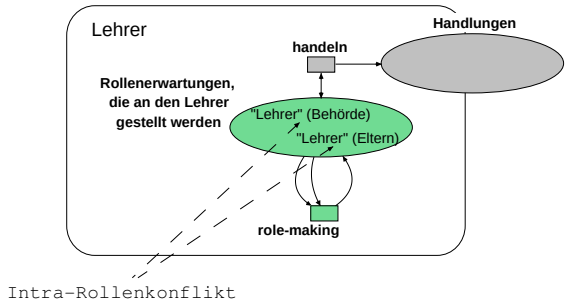


Abbildung 5.16: *Role making* im Intra-Rollenkonflikt

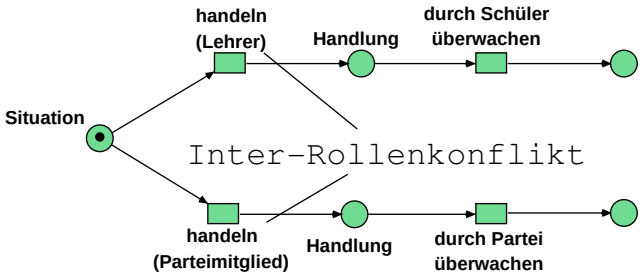


Abbildung 5.17: Inter-Rollenkonflikt

vermittelt, vom Parteimitglied, dass es die Parteiauffassungen vertritt. Die Bewältigungsformen ähneln denen beim Intra-Rollenkonflikt (vgl. Abb. 5.18, wo der Konflikt zugunsten der Rolle des Sozialkundelehrers aufgelöst wird).

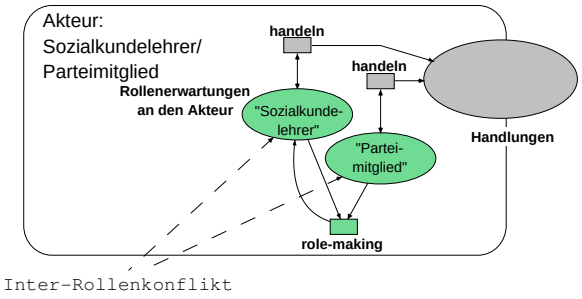


Abbildung 5.18: *Role making* im Inter-Rollenkonflikt

Viele Rollenkonflikte, die immer wieder auftreten, schleifen sich mit der Zeit ab. Es stellt sich ein Verständnis für die Nöte der Rollenhandelnden ein, Erwartungen werden gelockert oder fallen gelassen.

Eine angezweifelte Voraussetzung des Strukturfunktionalismus ist die hinreichende Kenntnis der Rollenerwartungen. Tatsächlich liegt oft ein defizitäres Rollenwissen vor, weil entweder die Sozialisation mangelhaft war oder die Rollenerwartungen als solche nur vage umschrieben sind. Beides erzeugt Verhaltensunsicherheit auf Seiten des Rollenträgers, der dann versucht, sich irgendwie

„durchzulavieren“, rituell handelt oder sich um Hilfestellungen bemüht. Auf jeden Fall muss er in der Lage sein, ein bestimmtes Maß an Unbestimmtheit auszuhalten.

Wenn der Rollenhandelnde nicht über die erforderlichen Ressourcen[15] verfügt, um die Rolle angemessen zu „spielen“, beeinträchtigt oder verhindert das sein Rollenhandeln. Er muss dann improvisieren, also „role making“ praktizieren.

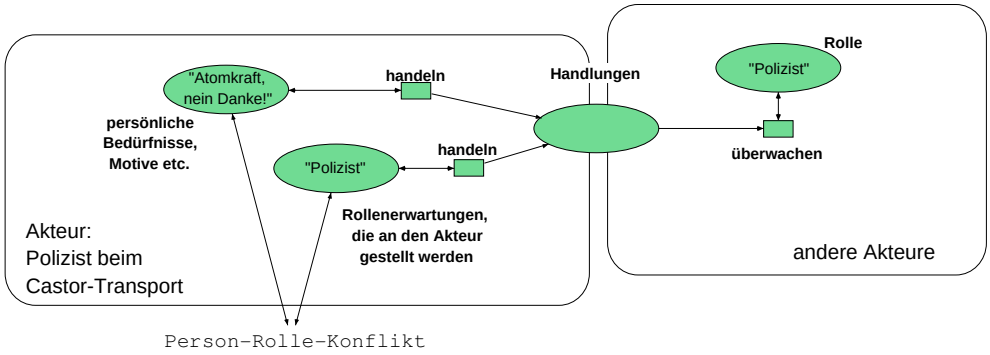


Abbildung 5.19: Person-Rolle-Konflikt

Ein Person-Rolle-Konflikt liegt vor, wenn die Rollenerwartungen nicht mit persönlichen Bedürfnissen, Einstellungen, Charakterzügen, Interessen und Zielen übereinstimmen (vgl. Abb. 5.19). Dies ist z.B. der Fall, wenn ein Polizist Castor-Transport-Gegner von den Schienen entfernen muss, jedoch Sympathie mit den Aktivisten empfindet. Eine Person kann durch ihre Rolle überfordert werden (ein Schüchterner wird zum Vorsitzenden gewählt) oder aber die Person überfordert die Rolle (eine Lehrerin verliebt sich in ihren Schüler). Rollendistanz ist eine Möglichkeit, solche Konflikte auszuhalten: Personen bringen die nicht mit der Rolle übereinstimmende eigene Identität zum Ausdruck (vgl. Abb. 5.20).

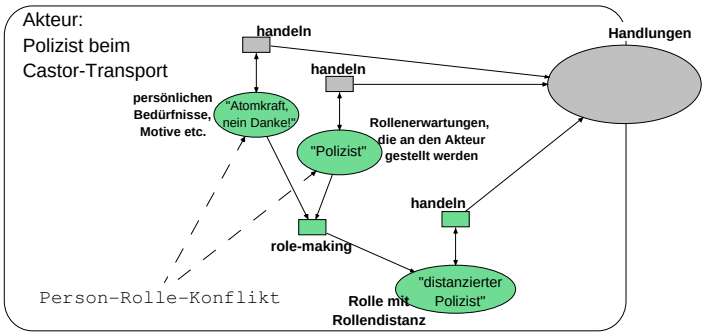


Abbildung 5.20: *Role making* im Person-Rolle-Konflikt

Person-Rolle-Konflikte entstehen aus der Unfähigkeit oder Unwilligkeit der Person, den Rollenerwartungen zu entsprechen.

[15] Gemeint sind sowohl körperliche Fähigkeiten als auch Kenntnisse über angemessenes Verhalten oder auch Ausstattung mit notwendigen Material.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass der Homo Sociologicus zwei Varianten des Rollenhandelns ausübt: das „role taking“ in Situationen mit Erwartungssicherheit durch Normen und das „role making“, wenn Komplikationen auftauchen. Die zunehmende Differenzierung der Gesellschaft macht immer mehr „role making“ erforderlich, denn sowohl die Anzahl als auch die Heterogenität der gesellschaftlichen Rollen hat zugenommen. Wenn es immer weniger Vorgaben für bestimmte Rollenkombinationen gibt, dann greifen normierte Standardlösungen nicht mehr.

Die beteiligten Akteure müssen unter solch kritischen Umständen die soziale Ordnung aufrecht erhalten, und zwar nicht durch die mechanische Anwendung fertiger Regeln, sondern situativ intersubjektiv – eben durch „role making“. Das „role taking“ bleibt jedoch gleichermaßen erhalten, da das meiste soziale Handeln habitualisiert vollzogen wird – es fällt nur noch wenigen auf.

5.2.2 Soziologisierter Homo Oeconomicus: Rational Choice

Die Rational Choice Theorie (Coleman, Esser, Lindenberg u.a.) schickt den ursprünglich in den Wirtschaftswissenschaften entwickelten nutzenorientierten und rationale Handlungswahlen treffenden Homo Oeconomicus als Konkurrent des normorientierten und erwartungsbezogene Handlungswahlen treffenden Homo Sociologicus ins Rennen der Akteurmodelle.

Während dem Homo Sociologicus aufgrund seiner Normorientierung keine Handlungswahlen im Sinne von Entscheidungen zugeschrieben werden,[16] setzt und verfolgt der Homo Oeconomicus bewusst Handlungsziele. Die Handlungswahl erfolgt nutzenorientiert (vgl. Abb. 5.21). Die Kosten- und Nutzengrößen sind nicht objektiv gegeben, sondern werden subjektiv erwartet. Wirkungen und Folgen des Handelns werden von jedem Akteur individuell eingeschätzt: „Geschmäcker sind verschieden“. Die Einschätzungen betreffen nicht nur Kosten und Nutzenhöhe, sondern auch Wahrscheinlichkeiten, mit denen für das Eintreffen bestimmter Handlungsfolgen gerechnet wird.

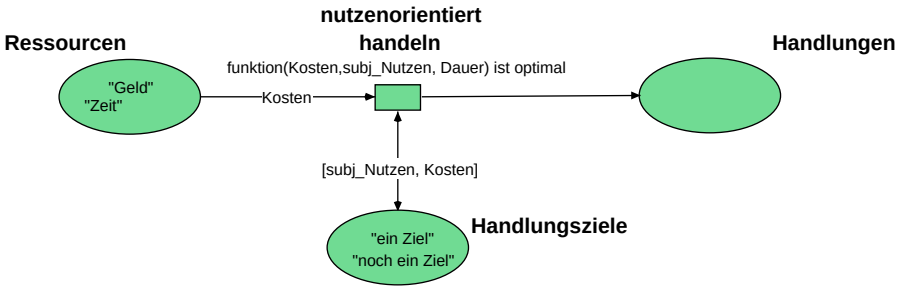


Abbildung 5.21: Nutzenorientierung bei der Zielverfolgung

Die Ressourcen zur Zielerreichung sind begrenzt. Zusammen mit der Nutzenorientierung ergibt das einen Akteur, der im Rahmen der verfügbaren Ressourcen nutzenmaximierend handelt. Die Knappheit der Ressourcen bezieht sich

[16] Denn auch für das role making gilt, dass primär Erwartungssicherheit angestrebt wird und dem entgegen stehende eigene Bedürfnisse eher verdrängt werden.

auf Geld, Macht, Wissen und Zeit. Da seine Ziele den Bereich des Möglichen übersteigen, ergibt sich die Notwendigkeit von Wahlentscheidungen. Es gilt: Je mehr verschiedene Ziele der Akteur verfolgt, desto weniger kann er diese bei gleicher Ressourcenausstattung und gleicher Intensität der Ziele realisieren. Die Knappheitserfahrung spitzt sich also mit der Zielvielfalt zu.

Für die meisten Handlungsziele liegt ein abnehmender Grenznutzen vor, d.h. der Zusatznutzen einer immer weiter getriebenen Zielverfolgung wird immer geringer – ein anderes Ziel gewinnt schließlich eine höhere Priorität für den Akteur. Jede Zielverfolgung bringt zudem Opportunitätskosten mit sich in Gestalt des dadurch entgehenden Nutzens der Verfolgung anderer Ziele. Es muss ein Vergleich stattfinden zwischen Nutzen und entstehenden Kosten (relativer Nutzen). Manchmal tut ein Akteur Dinge, die ihm wenig Nutzen bringen; nämlich dann, wenn ihm durch ein Handeln ein Nutzen entgeht, der geringer ist als der, den er erhält. Akteure tendieren dazu, Handlungswirkungen um so geringer einzustufen, je ferner deren Eintreten in der Zukunft erwartet wird. Insbesondere wenn kurzfristig erhebliche Kosten oder Nutzen erwartet werden, geraten längerfristige Wirkungen leicht aus dem Blick.

Zusammengefasst ist das Handeln des Homo Oeconomicus also durch Zielverfolgung mittels in der Regel knapper Ressourcen, Kosten/Nutzen-Bilanzierung von Handlungsalternativen bei zumeist starker Diskontierung der Zukunft und die Wahl der am meisten Gewinn versprechenden Handlungsalternative charakterisiert (vgl. Abb. 5.21). Soziologisch reflektiert wurde dieser Akteurtypus in erster Linie durch Webers Konzept des *zweckrationalen Handelns*. Die Rationalität der Mittelwahl zusammen mit der nutzenorientierten Zielverfolgung ergibt einen Homo Oeconomicus, dessen Handeln eine „rational choice“ ist: Es erfolgt die Wahl eines priorisierten Ziels bzw. die Gleichgewichtung mehrerer Ziele gemäß einer Nutzenkalkulation; die Mittel zur Zielerreichung werden rational nach Effizienz und Effektivitätskriterien ausgewählt.

Der Akteur ist in seinem Handeln fast immer mit anderen Akteuren konfrontiert und steht vor der Aufgabe, wechselseitige Interdependenzen zu bewältigen. Der Homo Oeconomicus reagiert mit einer Haltung des strategisch kalkulierenden miteinander Umgehens. Er beobachtet seine Gegenüber im Hinblick darauf, wie deren bereits erfolgtes oder erwartbares Handeln sich auf die Verfolgung seiner eigenen Handlungsziele auswirkt bzw. auswirken könnte, und sondiert, wie er die anderen Akteure möglicherweise beeinflussen könnte oder müsste und welche Mittel ihm dafür zur Verfügung stehen. Auf dieser Basis wählt er sein Handeln aus (vgl. Abb. 5.22).

Es macht einen Unterschied, ob der Akteur es mit wenigen oder vielen anderen Akteuren zu tun hat. Wenige Gegenüber kann er eher noch beeinflussen, vielen kann er sich oft nur anpassen (vgl. dazu den Prozess in Abb. 5.23, der durch Interaktionen mehrerer Akteure, die in Abb. 5.22 dargestellt sind, entsteht).

Die Abhängigkeit zwischen den Akteuren kann eher symmetrisch oder eher asymmetrisch sein; je asymmetrischer sie ist, desto mehr können die weniger abhängigen Akteure ihre Ziele durchsetzen. Es gibt dabei nicht nur einschränkende Interdependenzen. Sie können auch Möglichkeiten eröffnen, die der Akteur sonst nicht hätte, so in Situationen, in denen er auf aktive Unterstützung anderer angewiesen ist.

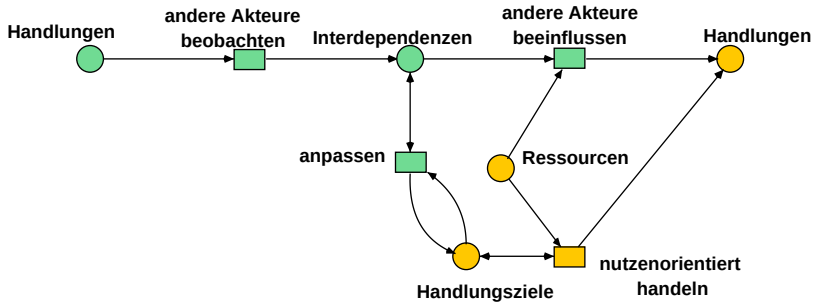


Abbildung 5.22: Beeinflussen vs. Anpassen

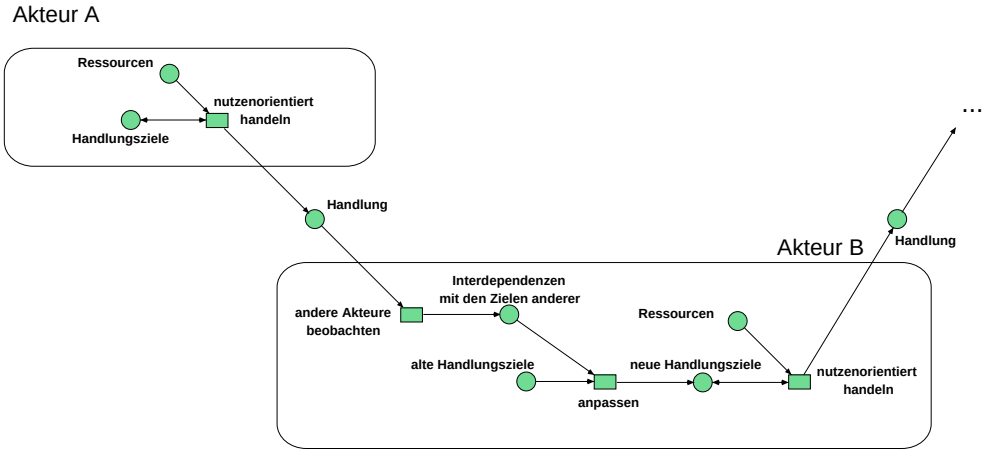


Abbildung 5.23: Interdependenz als wechselseitiges Anpassen (Prozessdarstellung)

Die Kombination von hinderlichen/förderlichen Interdependenzen mit tatsächlichen bzw. antizipierten Interdependenzen lassen folgende Typen von Interdependenzsituationen mit dazugehörigen Bewältigungsakten hervortreten:

- Das tatsächliche Handeln anderer stört bei der Zielverfolgung: es wird angestrebt, diese Störung auszuschalten, durch Beeinflussung oder Zielverschiebung.
- Das erwartete Handeln des anderen würde stören: es wird sich bemüht, dass diese Störung gar nicht erst eintritt.
- Das tatsächliche Handeln unterstützt die Zielverfolgung: es wird versucht, die anderen weiter bei der Stange zu halten oder sich von der Unterstützung unabhängig zu machen.
- Das erwartete Handeln der anderen würde unterstützen: es muss sichergestellt werden, dass dieses auch wirklich eintritt.

Im Vergleich zum Homo Sociologicus ergibt sich hier ein gänzlich anderes Bild von Sozialität: Hier ist Sozialität kein normativ geformter Erwartungszusammenhang, sondern ergibt sich über *wechselseitige Abhängigkeiten* der Akteure bei ihrer Zielverfolgung. Es liegen zwei distinkte analytische Akteurmodelle vor – was aber nicht ausschließt, dass reales Handeln manchmal eine so ausgeglichene Mischung von Norm- und Nutzenorientierung sein kann, dass beide Modelle miteinander verknüpft werden müssen.

Es lassen sich in der Literatur einige kritische Einwände gegen das Konzept des rational handelnden Nutzenverfolgers ausmachen. Diese sollen hier nur kurz zusammengefasst dargestellt werden.

Ein Einwand stellt in Frage, dass die Akteure den formulierten Anforderungen an die Rationalität ihres Handelns auch gerecht werden können. Da die Akteure meist weder in der Lage noch willens sind, die Rationalitätskriterien zu erfüllen, sei es realistischer, von einer begrenzten Rationalität zu sprechen (vgl. dazu March und Simon, 1958).

Weiterhin wird kritisiert, dass vielerlei Handlungen zwar nutzenbezogen erfolgen, aber deshalb keine rationale Wahl sind. Hierbei handelt es sich um mehr oder weniger komplexe, relativ starre Handlungsfolgen, die sich als Routinen etabliert haben. Die Habitualisierung von Handlungsabläufen bedeutet eine extreme Reduktion von Beobachtungs- und Reflexionsaufwand, weil man von situativen Besonderheiten, die immer wieder ein andersartiges Handeln nahe legen würden, absieht (vgl. Camic, 1986). Routinen sind nicht sonderlich begründungsbedürftig und Handlungsabstimmungen sind meist weder aufwändig noch konfliktär.

Ein dritter Einwand zielt auf die Einsatzbedingungen des Homo Oeconomicus ab. Er lautet, das Modell des Homo Oeconomicus könne Handeln nur in sogenannten Hochkostensituationen (für den Akteur steht viel auf dem Spiel) erklären, während es auf Niedrigkostensituationen (bei denen es um wenig geht) nicht anwendbar ist. So fixieren Hochkostensituationen die Aufmerksamkeit des Akteurs, die jeweilige (und nur eine einzige) Nutzenkomponente wird fokussiert,

der Rationalitätsdruck erhöht sich und das ermöglicht Rationalitätssteigerung. Je mehr der Akteur eine Situation als Hochkostensituationen wahrnimmt, desto mehr ist er geneigt, sich als Homo Oeconomicus zu verhalten, also die einer rationalen Nutzenverfolgung entgegen stehenden Handlungsantriebe[17] hintenan zu stellen. Er wird sich anstrengen, zeitliche, sachliche und soziale Rationalitätsbegrenzungen soweit wie möglich zu überschreiten.

Ein anderer Kritikpunkt geht noch weiter. Er behauptet, dass vieles Handeln, das als rational deklariert wird, in Wirklichkeit nur so tut, als sei es rational. Denn sowohl Fremd- als auch Selbstbeobachtung des Handelns unterliegen einer Rationalitätsfiktion. Hintergrund dieser Behauptung ist die Tatsache, dass das, was von den Akteuren an Rationalität kulturell abverlangt wird, nicht annähernd erfüllbar ist. Die Kluft zwischen hochgehaltenem Rationalitätsniveau und dem erfüllbaren Rationalitätsniveau wird dann durch Rationalitätsfiktionen überbrückt. Erfolgreiches Handeln legitimiert sich selbst über seine Ergebnisse. Akteure bemühen sich also, das zu tun, was andere für diese Situation als rational ansehen.

Insgesamt, so die Kritik, herrsche eine Alltagstheorie, dass rationales Handeln Probleme besser bewältigt als nicht-rationales. Um nicht wahrhaben zu müssen, dass Rationalität oft nicht möglich und vielleicht auch nicht immer sinnvoll ist, täusche man sich selbst mit Rationalitätsfiktionen. Das Konzept vom Homo Oeconomicus stütze diese Fiktion.[18]

Der fünfte Einwand richtet sich an die Nutzenvorstellungen der Akteure. So lange über Akteure im allgemeinen gesprochen wird, kann man ihnen höchstens eine so inhaltsleere Handlungsstrategie zuschreiben wie Maximierung des absoluten Nutzens. Spezifizierungen durch den Rational Choice Ansatz blieben bisher unbefriedigend, weil sie nicht erklären, warum spezielle Akteure gerade diese Nutzenvorstellungen haben und keine andere. Eine theoretische Fundierung und Spezifizierung der Nutzenvorstellungen ist dringend erforderlich. Dafür muss unter Zuhilfenahme anderer Theorien zunächst ein gut verwendbares Instrumentarium entwickelt werden.

Trotz der Berechtigung dieser fünf Einwände bleibt es aber zutreffend, dass für viele Erklärungsprobleme menschlichen Handelns das simple Erklärungsmodell des Homo Oeconomicus ausreichend ist.

5.2.3 Der „Emotional Man“

Bei dem Akteurtypus „Emotional Man“ werden, wie der Name sagt, Emotionen als Handlungsantrieb in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt. Der Typus des Emotional Man ist bei weitem noch nicht so differenziert ausgearbeitet wie die beiden vorangegangenen – wenngleich bereits Weber erkannte, dass das Handeln durch die momentane oder dauerhaft angelegte Gefühlslage von Personen bestimmt sein kann (Weber, 1922, 12). Dabei handelt es sich bei Emotionen

[17] ... wie Emotionen ausleben oder Identität behaupten...

[18] Wenn ein Handeln von allen Seiten als rational angesehen wird, hat die Rationalitätsfiktion eine erzieherische Wirkung. Der Akteur wird ermuntert oder gar ermahnt, sich um diese Rationalität zu bemühen – die Rationalitätsfiktion wird zur sich selbst erfüllenden Prophezeiung.

nicht um rein physiologische Reaktionsmuster; sie sind sozial geprägt. Als Antriebe sozialen Handelns kommen vor allem solche Emotionen in Betracht, die sich auf Inhalte und Formen *sozialer Beziehungen* richten, wie z.B. Liebe, Mitgefühl, Bewunderung, Neid, Hass, Verachtung und Schadenfreude.

Es gibt verschiedene Ursachen dafür, dass jemand emotional (und nicht normkonform oder nutzenverfolgend) reagiert. Dabei ist auf einen grundlegenden Unterschied zwischen dem Emotional Man und dem Homo Sociologicus bzw. Homo Oeconomicus zu verweisen: Der Emotional Man „tritt" in realen Situationen nur sporadisch auf, meistens überlässt er dem Homo Sociologicus und dem Homo Oeconomicus die Bühne. Emotionen bleiben oft „unsichtbar" im Hintergrund, sie können aber auch bei Kurzauftritten entscheidende Weichen für das weitere Geschehen stellen. Drei soziale Auslöser von Emotionen sind denkbar:

1. *Erwartungsenttäuschungen*: Normative (z.B. Pflichterfüllung), evaluative (z.B. zerschlagene Hoffnungen) oder kognitive Erwartungen (z.B. Dinge entwickeln sich anders als erwartet) werden enttäuscht. Je größer die Diskrepanz zwischen Erwartetem und Eingetretenem, desto eher werden Emotionen ausgelöst und somit Normkonformität und rationale Nutzenverfolgung unterbrochen. Die Schritt für Schritt vorgehende, logisch geordnete Deutung der Situation mit anschließender Ableitung situationsadäquaten Handelns wird aus der Bahn geworfen.

2. *Routinisierung*: Emotionen unterliegen oft einer Routine. Neid und Angst können sich in bestimmten sozialen Beziehungen und Situationen einschleifen. Das emotionale wird dann wie das rationale oder normative Handeln immer wieder ohne Hinterfragen ausgeführt.

3. *Inszenierte Emotionen*: Emotionen werden zur Schau getragen, die eigentlich gar nicht vorhanden sind.

Emotionen sind dabei nicht im Sinne eines „pure emotional man" (nach Flam, 1990) unwillkürlich, maßlos, inkonsistent, schwankend und schwer voraussagbar.[19] Sie sind als Handlungsantrieb vielmehr dadurch gekennzeichnet, dass sie durch soziale Normen und/oder Erwägungen rationaler Nutzenverfolgung kanalisiert und geformt werden.

Diese Kanalisierung kann sich auf die Tönung und die Intensität von Emotionen beziehen und sie sogar umformen.[20]

[19] In dieser Form würden sie ein permanentes Störrisiko für die soziale Ordnung darstellen.

[20] Emotionen und Normbefolgung schließen also einander nicht aus, sondern die Emotionalität wird durch soziale Normen vorgeschrieben, erlaubt, begrenzt oder untersagt. Auch zur rationalen Nutzenerwägungen gibt es eine Verbindung. Durch Gefühlskalküle wird bestimmt, welche Emotionen in welchem Maß und in welcher Form gezeigt werden sollten. Es kann sogar sein, dass entsprechende Gefühle nur vorgespielt oder inszeniert werden, um normativen oder rationalen Gesichtspunkten Rechnung zu tragen (Pseudo-Emotionalität). Dann ist das Modell des Emotional Man nur für die Startphase der Handlung erklärend und muss mit dem Homo Oeconomicus oder Homo Sociologicus fortgesetzt werden.

5.2.4 Der Identitätsbehaupter

Die Behauptung der persönlichen *Identität* kann zum vordringlichen oder ausschließlichen Handlungsantrieb werden. Als Identität eines Akteurs gilt hier sein Selbstbild. Bei Identitätsbeschreibungen lassen sich drei Äußerungsformen ausmachen:

1. *Evaluative Selbstansprüche*: Das sind Aufforderungen an sich selbst (z.B. strebsam sein) oder Forderungen an die soziale Umwelt (wie finanzielle Förderung meines Forschungsgebietes).

2. *Normative Selbstansprüche*: Sie bilden das Gewissen einer Person und können auf soziale oder individuelle, bezugsgruppenunabhängige Normen zurückgehen.

3. *Kognitive Selbsteinschätzungen*: Diese betreffen die Fähigkeiten und die Möglichkeiten einer Person, ihren evaluativen und normativen Selbstansprüchen gerecht zu werden. Daraus kann sich eine Diskrepanz zwischen dem faktischen So-Sein im Vergleich zum Sein-Wollen und -Sollen ergeben.

Die Identität ist nicht so umfassend und vielschichtig wie die Persönlichkeit. Sie ist die einseitige Hervorhebung einiger weniger Züge der Person – im Sinne eines Selbststeuerungsmechanismus des Akteurs.[21]

Zwei Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Identität eines Akteurs in sozialen Beziehungen wirksam wird. Zum einen braucht die Identität eines Akteurs soziale Bestätigung. Zum anderen muss sie durch Selbstdarstellung sozial präsentiert werden. Hier zeigt sich ein kausaler Zirkel: Soziale Bestätigungen produzieren und reproduzieren die Identität; und die Bestätigungen sind ihrerseits Reaktionen auf die identitätsgesteuerte Selbstdarstellung des Akteurs (vgl. dazu Abb. 5.8).

Seine Identität muss der Akteur während seiner gesamten Bestandsdauer aufbauen und wahren – die Identitätsbehauptung ist eine Daueraufgabe, selbst wenn sie über längere Zeit nur identisch reproduziert wird. Dieser Prozess vollzieht sich nicht intern, sondern als Auseinandersetzung mit der Umgebung. Hier liegt die fundamentale Bedeutung von Sozialität als identitätssichernder und -verunsichernder Umwelt eines Akteurs.

Andere Akteure sind die Spiegel, in denen der Betreffende sich selbst erkennt: Es sind die Reaktionen der anderen, die implizit oder explizit vermittelten Fremdbilder, mit denen er sein eigenes Selbstbild fortwährend abgleicht. Fremdbilder können das Selbstbild bestätigen oder nicht. *Soziale Bestätigungen* verfestigen die entsprechenden Identitätsbestandteile – um so mehr, je häufigere und gewichtigere Bestätigungen man erhält. Doch nicht jede einzelne Nichtbestätigung führt zu Identitätsveränderungen. So kann z.B. bewusst oder unbewusst die Umwelt jeweils so gewählt und gestaltet werden, dass es eher zu Bestätigungen als zu Nichtbestätigungen kommt.

[21] Auch *kollektive* oder *korporative Akteure* können Identitätsbehaupter sein. So spricht man bei formalen Organisationen (als *korporative Akteuren*) bekanntlich häufig von einer „coporate identity“ oder Organisationskultur. Hier werden zur Handlungsabstimmung der Akteure normative Erwartungsstrukturen als primär hervor gehoben und eingesetzt.

Um überhaupt die Chance auf Bestätigung zu haben, muss der Akteur im Handeln eine *Selbstdarstellung* betreiben, die mehr von ihm zum Ausdruck bringt als ein auf Rationalität, Normen oder Emotionen reduziertes Auftreten. Geht man z.B. vollständig in seiner Rolle auf, wird die Identität unkenntlich. Identitätsbehauptung ist folglich tatsächlich ein Handlungsantrieb *sui generis*, der nicht schon beiläufig durch die anderen Akteurmodelle mit bedient wird.

5.2.5 Die Zusammenführung der Akteurmodelle

Woher weiß man nun aber, welches der vier Akteurmodelle für ein konkretes Erklärungsproblem das am besten oder sogar einzig geeignete Modell ist? Gibt es eine sinnvolle Reihenfolge, in der die vier Modelle durchprobiert werden sollten? Schimank schlägt vor, die Bearbeitung dieser Fragen getrennt nach analytischer und theoretischer Prioritätensetzung anzugehen. Die analytische Priorisierung geschieht dabei aus erklärungsökonomischen Gründen, die theoretische Priorisierung verweist auf das Vorkommen in der modernen Gesellschaft. Wir werden sehen, dass analytisches und theoretisches Primat auseinander fallen.

Als erstes gilt es zu klären, ob das Handeln durch das Sollen (Außenantrieb) oder das Wollen (Eigenantrieb) bestimmt wird. Wird es durch das Sollen angeleitet, landet man beim Homo Sociologicus, der normativen Erwartungen folgt, die von außen an ihn gerichtet werden - auch wenn es manchmal so aussieht, als wenn das Sollen durch Internalisierung zum Wollen geworden ist. Der Homo Oeconomicus hingegen ist deutlich stärker durch sein Wollen bestimmt, indem er eigene Nutzenvorstellungen verfolgt. Ebenso überwiegt beim Emotional Man und beim Identitätsbehaupter das Wollen.

Als nächstes ist zu klären, in welchem Maße die Handlung reflektiert wird. Hier ist zwischen Routine und Entscheidung zu differenzieren (vgl. Luhmann, 1964)[22]. Nun sind Homo Sociologicus und Homo Oeconomicus weder eindeutig dem entscheidungsförmigen noch dem routinehaften Handeln zuzuordnen. Auch Normkonformität kann dem Akteur Entscheidungslasten aufbürden (z.B. bei Rollenkonflikten) und Nutzenverfolgung kann sich auf Routinen einlassen, wenn dies mehr Nutzen als das Treffen von Entscheidungen bringt. Eben solches gilt für emotionales und identitätsbehauptendes Handeln.

Sollensgeprägtes Handeln ist einfacher erhebbar als Wollensprägungen, Routinen einfacher als Entscheidungen. Soziale Normen und Routinen sind kollektiv geteiltes Wissen aller Handelnden, das z.T. sogar in verschriftlicher Form vorliegt, und somit leichter erfragbar, beobachtbar und oft auch Gegenstand eigener Erfahrungen ist. Wollensausprägungen und Entscheidungen sind hingegen höchst individuell und schwer zugänglich – oft nicht einmal dem Handelnden selbst. Da dem Homo Sociologicus erklärungsökonomisch gesehen der geringste empirische Erhebungsaufwand zukommt und er deshalb als erstes auf seine Erklärungskraft hin überprüft werden sollte, schlägt Schimank pragmatisch vor, dass ihm somit auch analytisch gesehen die Priorität eingeräumt wird.

[22] Routinen schaffen Reflexionsverzicht. Es wird gehandelt, wie schon immer in solchen Situationen gehandelt wurde. Entscheidungen hingegen thematisieren die Kontingenz. Der Akteur reflektiert über mögliche Handlungsalternativen.

Das allgemeine Modell, das sich aus der Kombination und Integration der Modellgrundstrukturen ergibt, ist in Abb. 5.24 dargestellt. Es sind dabei alle vier Akteurmodelle strukturell auf einer sehr abstrakten Ebene kombiniert worden. Die allgemeinen Netzelemente stehen mit den Konzepten der vorangegangenen Modelle des Homo Sociologicus (HS), des Homo Oeconomicus (HO), des Emotional Man (EM) und des Identitätsbehaupters (IB) wie folgt in Beziehung:

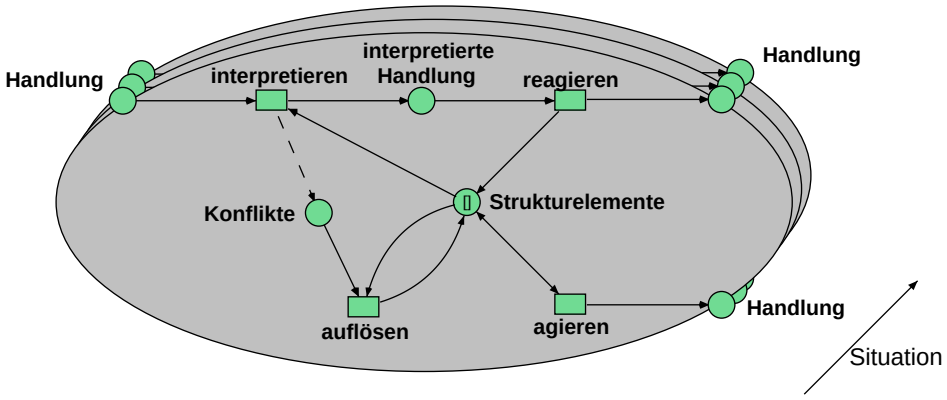


Abbildung 5.24: Allgemeine Sicht auf die vier Akteurmodelle, situativ abhängig

- Strukturelemente = Normen (HS), Rollen (HS), Ziele (HS/HO), Ressourcen (HO), Emotionen (EM) und die Identität (IB).
- Konflikte auflösen = role making (HS), Ziele anpassen (HO), Emotionen ausleben (EM) sowie Identität wahren/reproduzieren (IB).
- agieren, reagieren = in Abhängigkeit der Strukturelemente und Situation handeln (dies entspricht gerade dem Akteurmodell).
- Die Situation wird durch die Annahmen und Erwartungen des Akteurs über andere Akteure geformt. Sie wird in diser Abbildung durch die Auffaltung des Netzes in verschiedenen Ebenen repräsentiert.

Die Strukturelemente der Akteurmodelle werden erst in ihrem Zusammenwirken wirksam. Dies gilt zum einen für die Reproduktion als auch für die Modifikation durch Interferenzen. Die in Abb. 5.24 durch die Stelle Konflikte hervorgehobenen Interferenzen werden als Dynamiken der Abweichungsdämpfung und -verstärkung bezeichnet. Abweichungsverstärkend sind Dynamiken, die auf Aufbau oder Änderung der Strukturen (Erwartungs-, Deutungs- oder Konstellationsstrukturen) hinwirken; abweichungsdämpfend sind solche, die auf Strukturerhaltung drängen.

Deutungsstrukturen: Hier handelt es sich um kognitive und evaluative Orientierungen, die sich um kulturelle Leitideen gruppieren, also Werte, binäre Codes gesellschaftlicher Teilsysteme (wie Wahrheit in der Wissenschaft und Macht in der Politik). Sie sind evaluativ, weil sie Maßstäbe des Erstrebenswerten formulieren, und kognitiv, weil sich hier etablierte Sichtweisen niederschlagen.

Erwartungsstrukturen: Dies sind institutionalisierte normative Erwartungen wie rechtliche oder formalisierte Regeln, aber auch alle Arten informeller Regeln z.B. innerhalb von Gruppen. Normative Erwartungen werden in Rollen gebündelt.

Konstellationsstrukturen: Es geht dabei um eingespielte Gleichgewichte von Akteurkonstellationen, die dann vorliegen, wenn sich ein bestimmtes Muster handelnden Zusammenwirkens von Akteuren in dem Sinne verfestigt, dass kein Beteiligter von sich aus seine Handlungsweise ändern kann. Viele Konstellationsstrukturen manifestieren sich in Verteilungsmustern (insbesondere bezüglich Macht, Wissen, Geld, Chancen der Bedürfnisbefriedigung).

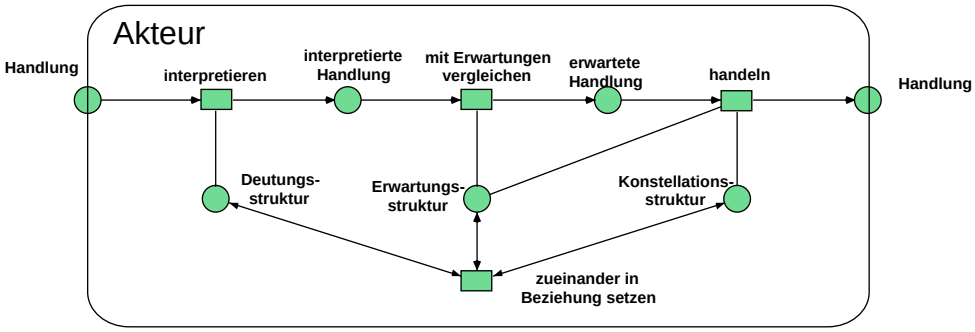


Abbildung 5.25: Soziale Struktur eines Akteurs

Die Herausbildung dieser Strukturen als prozesshaftes Zusammenwirken von Akteuren wird im folgenden erörtert.

5.3 Intersubjektivität: Strukturdynamik[23]

Wie gehen soziale Strukturen aus dem handelnden Zusammenwirken von Akteuren hervor? Hier sind die Modelle sozialer Strukturdynamiken als theoretische Instrumente einzuführen (die „Logik der Aggregation“ nach Esser). Im Gegensatz zum vorangegangenen Abschnitt ist nun das Handeln die unabhängige Variable und die sozialen Strukturen die abhängige. Wir betrachten im folgenden Akteurkonstellationen und Strukturdynamiken, hier speziell Konstellationen wechselseitige Beobachtung, wechselseitiger Beeinflussung und wechselseitigen Verhandelns.

Das handelnde Zusammenwirken in einer Akteurkonstellation bringt soziale Dynamiken hervor, die soziale Strukturen aufbauen, erhalten oder verändern. Strukturelle Effekte liegen dabei häufig jenseits der Intention der beteiligten Akteure. Von Bedeutung ist außerdem die Unterscheidung von offenen und geschlossenen sozialen Dynamiken.

Strukturdynamiken sind geschlossen, wenn eine wechselseitige Zuschreibung von Intentionen und eine Einschätzung von Einflusspotentialen stattfindet – also eine fortdauernde kausale Wechselwirkung zwischen den Handlungsketten

[23] Dieser Abschnitt basiert auf einer bislang unveröffentlichten Arbeit, die ich gemeinsamen, mit meiner Kollegin Daniela Spresny geschrieben habe.

vorliegt. Dies ist auch bei mehr als zwei Akteuren möglich. Entscheidend ist die Geschlossenheit des Zusammenhangs der Handlungsauflösung auf Seiten der beteiligten Akteure. Das bedeutet für die Akteure, dass sie in der Lage sind, die Muster der Wechselwirkung zu erkennen und einen Blick für die daraus hervorgehenden Struktureffekte bekommen können. Der regelmäßige Verlauf ermöglicht eine Vorhersage des zukünftigen Geschehens. Geschlossenen Strukturdynamiken sind in diesem Sinne überraschungsfrei. Strukturdynamiken sind offen, wenn das handelnde Zusammenwirken der jeweiligen Akteure weder planvoll, also intentional aufeinander bezogen, war noch eine Abstimmung durch strukturelle Mechanismen „hinter dem Rücken“ der Beteiligten erfolgte. Aus Sicht Akteure sind offene Strukturdynamik unvoraussagbar.

Akteurkonstellationen sind nichts anderes als das Gewahrwerden und Abarbeiten von Intentionsinterferenzen. Intentionsinterferenzen entstehen bei allen Arten von Handlungsantrieben, denn bei kaum einem Handeln kann der Akteur seine Intentionen unabhängig von anderen verfolgen. Entweder braucht er die Unterstützung anderer oder er ist davon abhängig, dass andere ihn bei seinem Tun nicht stören. Er kann auf zweierlei Weise mit diesen Interferenzen umgehen: den Widerstand der anderen umgehen oder durch gezielte Beeinflussung der andern diesen (zumindest teilweise) überwinden. Meist bringt die Bewältigung von Intentionsinterferenzen soziale Strukturen in Form von relativ dauerhaften Handlungsmustern hervor. Dies kann z.B. eine normative Ordnung sein.

Alle drei Arten sozialer Strukturen – Erwartungs, Deutungs- und Konstellationstrukturen – werden durch das Abarbeiten von Intentionsinterferenzen aufgebaut, erhalten oder verändert. Dies kann als gewollte Strukturgestaltung vonstatten gehen, kann aber auch eine beiläufige Neben- oder Fernwirkung der Abarbeitung von Intentionsinterferenzen sein. Sie ist unintendiert, falls sie sich entweder beiläufig aus dem handelnden Zusammenwirken (als unvorhergesehener Effekt) ergibt oder etwas anderes als beabsichtigt herausgekommen ist (als ungewollter Effekt). Intentional ist handelndes Zusammenwirken also nur dann, wenn seine Struktureffekte sowohl so wie gewollt als auch so wie vorgesehen eintreten.[24]

5.3.1 Konstellationen wechselseitiger Beobachtung

Wechselseitige Beobachtung ist die elementarste Art der Akteurkonstellation. Sie liegt vor, wenn Akteure sich aufeinander einstellen, ohne sich gezielt zu beeinflussen oder zu verhandeln. Es erfolgt eine beidseitige Anpassung an wechselseitige Beobachtungen. Soziologisch ist die Frage relevant, wie sich hierdurch normative Erwartungsstrukturen herausbilden. Die Antworten von Luhmann und Berger/Luckmann hierzu sind ähnlich: Zu der Problematik, dass Ego sich bei seiner Wahl einer Handlungsalternative auch von der Handlungswahl seines

[24] Elias hat sich von allen Soziologen am meisten darum bemüht, Zusammenhänge zwischen Akteurkonstellationen und Strukturdynamiken zu klären. Er bezeichnet dieses Verhältnis als Figuration und trifft folgende Aussage: Wenn die Intentionen verschiedener Akteure vollständig miteinander kompatibel sind, entspricht der Struktureffekt ihres Zusammenwirkens dem, was sie wollen. Je inkompatibler die Intentionen, desto ungewollter die Struktureffekte.

Gegenüber leiten lassen muss, entwickelte Luhmann das Konzept der *Autokatalyse*. Dabei wird es als zunächst unwahrscheinlich gesehen, dass das eigene Handeln Anknüpfungspunkte im Handeln anderer findet. Dann wird aber jede Selbstfestlegung, wie immer sie auch zufällig entstanden ist, Informations- und Anschlusswert für weiteres Handeln gewinnen (vgl. Luhmann, 1984). Aus wechselseitiger Beobachtung, sequentiellem Reagieren aufeinander und beiderseitigem Wissen darüber, beobachtet zu werden, können stabile Erwartungsstrukturen erwachsen. Berger und Luckmann (1997) haben die als Zusammenwirken von Habitualisierung und Typisierung sowie darauf aufbauender Institutionalisierung herausgearbeitet. Handlungsweisen werden habitualisiert (individuell routinisiert), was den Beobachtern Typisierungen des Handelns ermöglicht. Dies geht dann in Institutionalisierung über, die aber erst dann gefestigt ist, wenn sie über die ursprüngliche Dyade hinaus geht, also ein dritter, vierter oder fünfter Akteur einbezogen wird. Dann vollzieht sich ein qualitativer Sprung: Das Größenwachstum der Konstellation schließt sehr schnell situative Handlungsabstimmungen aus.

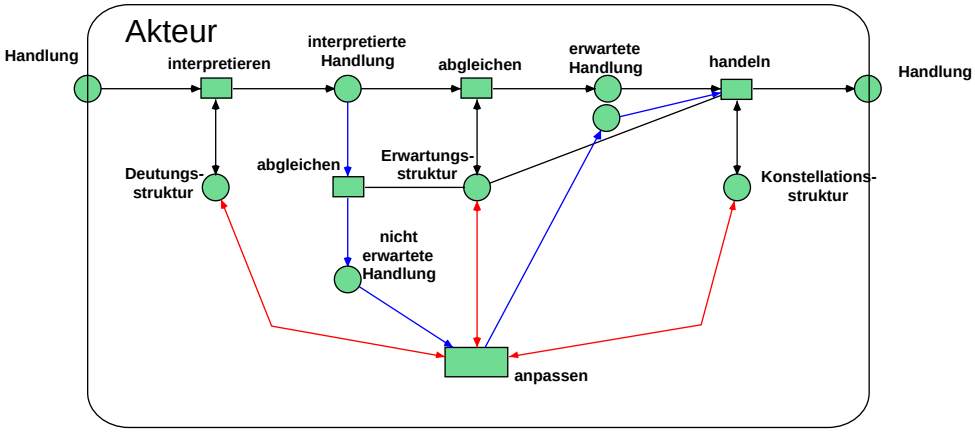


Abbildung 5.26: Wechselseitiges Beobachten bewirkt Abweichungsdämpfung oder -verstärkung

Abweichungsverstärkend sind Dynamiken, die auf Aufbau oder Änderung der Strukturen (Erwartungs-, Deutungs- oder Konstellationsstrukturen) hinwirken; abweichungsdämpfend sind solche, die auf Strukturerhaltung drängen.

Soziale Kontrolle ist zentral für die Erhaltung normativer Erwartungsstrukturen. Dieser Mechanismus funktioniert auch über die Antizipation dessen, was geschehen würde, wenn man sich nicht normkonform verhielte. Die Konformität mit Deutungsstrukturen wird auf ähnliche Weise gesichert wie die Konformität mit Erwartungsstrukturen. Der Mechanismus wirkt somit abweichungsdämpfend.

Um Strukturerhaltung generell zu erklären, muss man erstens nach Bedingungen Ausschau halten, die es den Akteuren ermöglichen, Veränderungstendenzen zu erkennen oder vorauszusehen, und zweitens Handlungsmöglichkeiten identifizieren, mittels derer die Akteure solchen Tendenzen entgegen wirken können. Hieran wird erneut deutlich, dass sich Strukturerhaltung prozesshaft vollzieht.

Strukturaufbau entssteht durch Abweichungsverstärkung, beispielsweise indem eine zufällige Anfangsentscheidung für andere gut sichtbar ist und deren Entscheidungen gleichsam in ihren Bann zieht – immer mehr, bis schließlich der Zufall zur Notwendigkeit wird. Oder sie verläuft nach dem Prinzip „Wer hat, dem wird gegeben“. Merton geht davon aus, dass z.B. die Sichtbarkeit eines Wissenschaftlers für seine Kollegen mit dessen Reputation korreliert. Je höher die Reputation, desto wahrscheinlicher wird sein Aufsatz in einer Fachzeitschrift gelesen, die Reputation steigt, er bekommt eher Forschungsmittel, die Reputation steigt weiter usw. Reputation verschafft Ressourcen, die weiteren Reputationerwerb erleichtern, was wiederum Ressourcen verschafft etc.

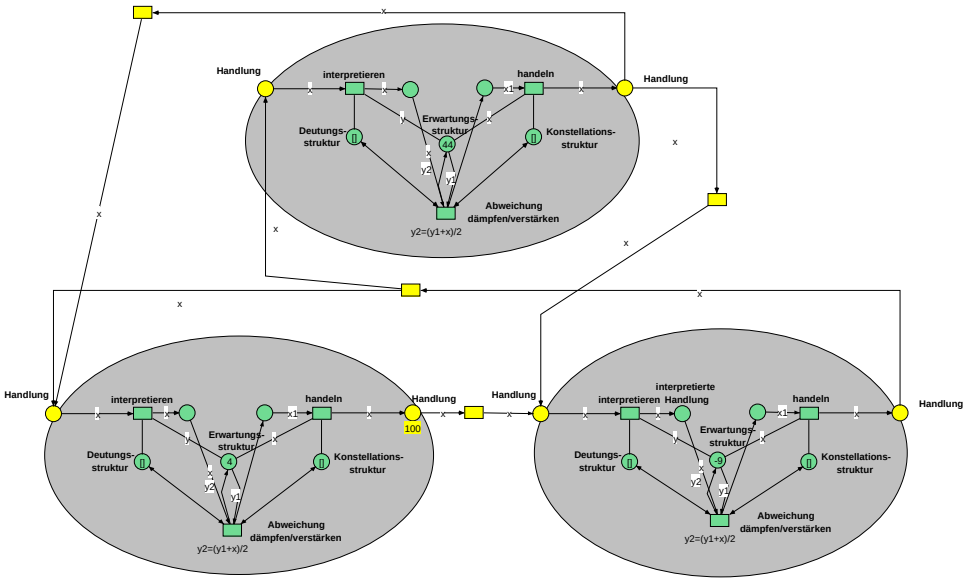


Abbildung 5.27: Konstellationsszenario mit explizit visualisierter Konstellationsstruktur

5.3.2 Konstellationen wechselseitiger Beeinflussung

Akteure können sich nicht nur beobachten, sie können sich auch beeinflussen. Dann wird das (beobachtbare) Handeln mit dem Einsatz von Einflusspotential verknüpft, es wird zum Einflusshandeln. *Einfluss* liegt vor, wenn der Handlungsspielraum des Gegenübers gezielt eingeschränkt wird. Oft geschieht das durch Machtausübung. Allgemein wird Einfluss ausgeübt, wenn das Gegenüber anders handelt als ohne Einflussnahme. Einfluss kann darauf abzielen, dass ein ganz bestimmtes Handeln ausgeführt oder unterlassen wird. Oder es soll erreicht werden, dass sich das Handeln des anderen in einem bestimmten Rahmen bewegt. Manchmal werden die Handlungsmöglichkeiten des anderen durch Einflussnahme sogar erweitert – auch wenn der Spielraum im Ergebnis doch eingeschränkt wird.[25]

[25] beispielsweise wenn ich jemandem erst Machtbefugnisse erteilen muss, damit er eine bestimmte Aufgabe für mich erledigen kann.

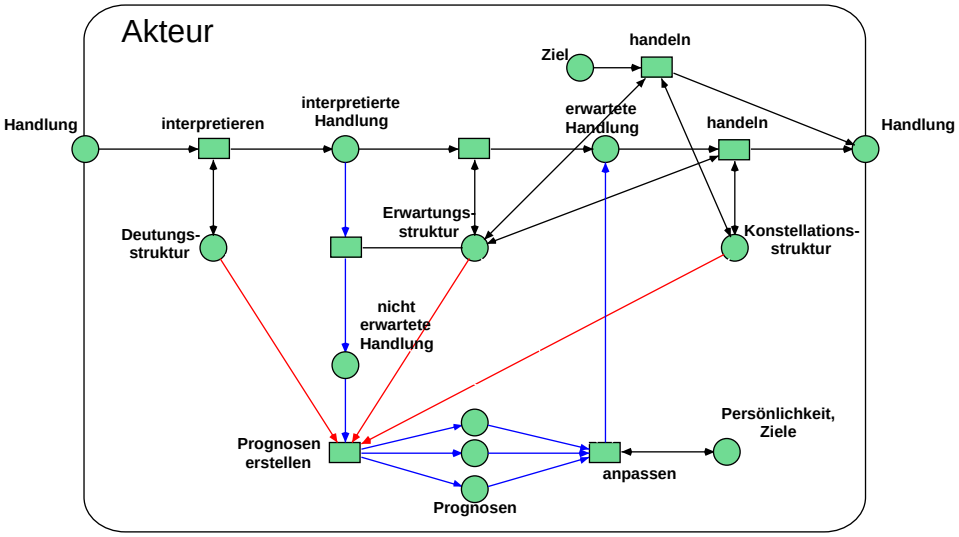


Abbildung 5.28: Akteur mit Strukturanpassung, die auf Prognosen beruht

Die Ansatzpunkte von Einflussnahme beim Gegenüber sind nach Schimank (2000) die *vier Handlungsantriebe*: Normkonformität, Nutzenverfolgung, Ausleben von Emotionen und Identitätsbehauptung. Der jeweils dominante muss angepackt werden oder die Einflussnahme wirkt darauf hin, den dominanten Handlungsantrieb auszuwechseln: Man kann durch Geld die Nutzenerwägungen des anderen ansprechen, eine bestimmte Emotion beim anderen auslösen, den Identitäsbehaupter an seine evaluativen oder normativen Selbstansprüche erinnern oder den Normkonformen durch Achtungserweis oder Androhung von Achtungsentzug beeinflussen.

Beeinflussen kann man mit Geld, physischer Gewalt, moralischen Apellen, Rechtsnormen, wissenschaftlichen Erkenntnissen, Liebe, Sympathie, Lob, persönlichem Charisma, guten Beziehungen, glaubwürdigen Selbstbindungen (denn dadurch, dass man sich selbst keine Wahl lässt, hat auch der andere keine).[26] *Belohnungen* wirken über einzulösende Versprechungen. Die Versprechung muss glaubwürdig sein, d.h. der Gegenüber muss annehmen, dass der andere das versprochene Geld auch auszahlen will, kann und wird. Der zu beeinflussende musss hinreichend am Geld interessiert sein. Auch durch Überzeugung, wobei oftmals mit wissenschaftlich gedeckten Wahrheiten gearbeitet wird, kann beeinflusst werden. *Bestrafungen* wirken über einzulösende Drohungen im Falle von Nicht-Fügsamkeit. Sie sind nur dann erfolgreich, wenn man sie nicht auszuführen braucht. Dies lässt sich besonders deutlich anhand von Macht studieren. Der Machthaber kann seinen Gegenüber für den Fall der Nicht-Fügsamkeit in einer Weise behandeln, die diesem noch unattraktiver als die Fügsamkeit erscheint. Wenn die Drohung aber tatsächlich ausgeführt werden muss, hat seine Macht versagt – er hat nicht bekommen, was er wollte und muss etwas tun, was er eigentlich nicht wollte. Findet er aber Gehorsam, so ist Einflussnahme

[26] Vgl. auch die Kapitalsorten bei Bourdieu.

durch Macht sehr unaufwändig.[27] Auch bei (angedrohten) Bestrafungen muss Glaubwürdigkeit dahinter stehen: Der andere muss davon ausgehen, dass der eine willens und in der Lage ist, seine Drohung wahr zu machen. Ein weiterer Aspekt der Glaubwürdigkeit ist, dass der andere überzeugt sein muss, im Falle von Fügsamkeit auch tatsächlich nicht bestraft zu werden.

Geld hat ein höheres Generalisierungsniveau als spezifische Güter oder Dienste. Formale Macht ist dagegen weniger generalisiert. In formalen Organisationen sind Kompetenzbereiche abgesteckt und legen sachlich, sozial und zeitlich fest, wer über wen und was wie lange gebieten kann. Liebe z.B. hat sozial einen geringen, sachlich und ggf. auch zeitlich aber einen durchaus starken generalisierten Einfluss. Der Einfluss durch Wahrheit ist sachlich gering, dafür aber zeitlich und sozial stark generalisert.

Einfluss, etwa Macht, kann man nicht besitzen; er hat einen relationalen und dynamischen Charakter, der in bestimmten Konstellationen zum tragen kommt. Über welchen Einfluss also jemand verfügt, lässt sich nicht durch die isolierte Betrachtung eines Akteurs ergründen, sondern zeigt sich erst in der Beziehung zu seinem Gegenüber, weil dieser ebenfalls über ein Einflusspotential verfügt. Einflusskonstellationen sind also Konstellationen *wechselseitiger* Beeinflussung – im einfachsten Falle als Dyade zwischen Ego und Alter. Aus wechselseitigen Abhängigkeiten ergeben sich also Chancen der gegenseitigen Beeinflussung. Dabei müssen immer beide *Beeinflussungsrichtungen* in den Blick genommen werden. Das kann man sich gut an stark asymmetrisch strukturierten Machtbeziehungen, wie man sie z.B. in formalen Organisationen vorfindet, klar machen. Hier hat der Vorgesetzte Anordnungsbefugnisse; fügt sich der Untergebene nicht, sanktioniert der Vorgesetzte (Karriere behindern, abmahnen, kündigen) und setzt Drohungen zur Erlangung von Fügsamkeit ein, die sogar über seine formale Machtposition hinaus reichen. Aber auch der Untergebene verfügt – allein oder zusammen mit anderen - oft über ein erhebliches Einflusspotential. Er hat Mitentscheidungsrechte (etwa über die betriebliche Mitbestimmung) und der Vorgesetzte ist stark von seiner Leistungsbereitschaft abhängig, wie jeder „Dienst nach Vorschrift“ zeigt. Die Drohung, nicht mehr zu tun, als auf dem Papier verlangt wird, zeigt die Grenzen formaler Macht besonders deutlich. Vor allem Spezialisten mit wichtigen und knappen Fähigkeiten können sich so einige Vorteile verschaffen. Das Verhältnis von formaler Macht und funktionaler Autorität kann sich geradezu umkehren.

Bei Einflusskonstellationen mit mehr als zwei Akteuren nimmt die Wahrscheinlichkeit nicht-intendierter Effekte des handelnden Zusammenwirkens zu. Bereits eine Triade weist ganz andere Möglichkeiten auf als eine Dyade. An Triaden lassen sich die wichtigsten Grundmuster studieren, die sich auch in Konstellationen mit noch mehr Akteuren abspielen können.[28] In einer Triade bietet sich die Möglichkeit, dass sich zwei Akteure *gegen einen Dritten zusam-*

[27] Anders als bei Belohnungen. Hier muss bei Fügsamkeit etwas geleistet werden (z.B. das versprochene Geld muss übergeben werden). Während die tatsächlich verfügbaren Belohnungen begrenzt sind, können beliebig viele Drohungen ausgesprochen werden.

[28] Reale Konstellationen aus einer Vielzahl von Akteuren lassen sich im Hinblick auf die bedeutsamen Interdependenzen für das jeweilige Erklärungsproblem oft auf Dyaden oder Triaden reduzieren.

mentun. Wenn in einer Triade ein Akteur die Gefahr sieht, dass sich die beiden anderen gegen ihn verbünden, hat er gelegentlich die strategische Möglichkeit des „teile und herrsche“, z.B. indem er die Kommunikation zwischen den beiden verhindert, Zwist zwischen ihnen sät oder sie zu Konkurrenten um ein ihm eigenes Gut macht. Derjenige der nach dem Prinzip „teile und herrsche“ verfährt, kann der einflussschwächste der Triade sein und sie dennoch dominieren, indem er die Einflüsse der Stärkeren neutralisiert.

Erwartungsstrukturen befriedigen das grundlegende Bedürfnis nach Erwartungssicherheit. Darüber hinaus möchte aber jeder, dass die Erwartungsstrukturen für die Realisierung seiner eigenen Interessen möglichst günstig beschaffen sind – was bedeutet, dass hier konkurrierende Wünsche aufeinander treffen). In einer ausgeglichenen Einflusskonstellation entsteht eine geteilte Erwartungsstruktur nicht so einfach, als wenn es einen überlegenen Akteur geben würde. Jeder will sich dem andern nicht fügen, so dass zunächst keine Erwartungssicherheit entsteht. Trotzdem sind auch Regelungen möglich, die eine geteilte Erwartungsstruktur zur Folge haben.

Dominante Akteure verfolgen oft bewusste Gestaltungsabsichten bezüglich der sie umgebenden Strukturen. So kann der Leiter einer Organisation die formalen Verhaltenserwartungen (Arbeitszeiten etc.) schaffen (bei Organisationsgründung) und verändern. Streben die Organisationsmitglieder ihrerseits auf Veränderungen, so kann er dies mittels formaler Macht (z.B. Kündigungsdrohung) unterbinden. Die beeinflussten Akteure schließen leicht von Faktizität auf gewollte Normsetzung, d.h. sie betrachten die wiederholte Praxis als Regel.[29] Auf diese Weise können sich normative Erwartungsstrukturen, die keiner gewollt hat, dennoch als äußerst langlebig erweisen. Dominante Akteure können ebenfalls Deutungsstrukturen gestalten, etwa durch die (charismatische) Verbreitung von Weltanschauungen oder theoretischer Schulen in der Wissenschaft. Das gilt auch für Konstellationsstrukturen, z.B. dadurch, dass gesellschaftlich Mächtige nicht nur die Macht-, sondern auch die Reichtumsverteilung zu ihrem Vorteil gestalten können.

Insgesamt zeigt sich, dass Konstellationen wechselseitiger Beeinflussung sowohl dann, wenn es eine Einflussdominanz eines Akteurs gibt, als auch dann, wenn dies nicht der Fall ist, Erwartungs-, Deutungs- und Konstellationsstrukturen schaffen, erhalten oder verändern können.

5.3.3 Konstellationen wechselseitiger Verhandlung

Wenn sich Akteure nur beeinflussen, muss dies noch lange nicht zu bindenden Vereinbarungen führen. Bindende Vereinbarungen sind das Ziel von Verhandlungskonstellationen. Erwartungsstrukturen, die aus Beeinflussungskonstellationen resultieren, gewinnen ihre Stabilität nicht aus bindenden Vereinbarungen,

[29] Ein Beispiel: Der Organisationsleiter stellt für eine bestimmte Position immer wieder Frauen ein, aus dem einen Grund, dass jeweils keine geeigneten männlichen Kandidaten zur Verfügung standen. Delegiert er diese Aufgabe dann an einen Untergebenen, kann es sein, dass dieser die geübte Praxis als Norm ansieht und ebenfalls nur Frauen einstellt. Wenn dies vom Leiter dann nicht dementiert wird, weil ihm das nicht bewusst wird, so hat sich die Erwartungsstruktur dann endgültig verfestigt.

sondern aus Zug um Zug bewiesener (also praktizierter) Normtreue der Beteiligten. Der Normgehalt kann dabei sogar gänzlich unausgesprochen bleiben, er wird allein durch das wiederholte Handeln immer wieder aufs Neue bestätigt. Eine so gewonnene Erwartungsstruktur muss auch nicht instabiler sein als eine, die auf expliziten Vereinbarungen beruht. Und durch bindende Vereinbarungen werden strukturelle Effekte möglich, die von anderer Qualität als die von Beobachtungs- und Beeinflussungskonstellationen sind. Verhandlungen haben hinsichtlich der Situationskontrolle eines beteiligten Akteurs eine Mittelstellung zwischen Beobachtungen (geringe Situationskontrolle) und Beeinflussungen (hohe Situationskontrolle). Am liebsten würde man beeinflussen, wenn das nicht geht aber verhandeln, weil das vielversprechender ist als beobachten.

Man muss nicht zwangsläufig beeinflussen und verhandeln, wie man zwangsläufig beobachten muss. Akteure müssen verhandlungswillig sein, weil sie sich etwas davon versprechen. Verhandlungen setzen (im Gegensatz zu Beeinflussung) immer Wechselseitigkeit voraus. Aber auch die, die nicht mitverhandeln, müssen sich an bindende Vereinbarungen halten - denn die Bindungswirkung erstreckt sich auf die Gesamtheit der in einer Konstellation involvierten Akteure.[30] Verhandlungswilligkeit setzt voraus, dass die Akteure mehr erreichen können als durch wechselseitige Beobachtung oder Beeinflussung, die Schaffung bindender Vereinbarungen muss als lohnend erscheinen[31] – der Homo Oeconomicus wird hier angesprochen. Bindende Vereinbarungen müssen ihnen erstens einer bessere Bewältigung ihrer Intentionsinterferenzen versprechen und keiner darf einen so dominanten Einfluss besitzen, dass er den anderen Fügsamkeit auferlegen kann.

Akteure müssen interagieren, um zu einer bindenden Vereinbarung (meist schriftlicher Vertrag oder mündlicher Quasi-Vertrag) zu kommen. Diese schafft Erwartungssicherheit, wie wechselseitige Beobachtung und Beeinflussung auch. Was ist die besondere Qualität bindender Vereinbarungen?

In Konstellationen wechselseitiger Beobachtung gewinnt der Akteur situative und kognitive Erwartungssicherheit durch Zuschreibungen, d.h. er versetzt sich in die Lage seines Gegenübers, macht sich dessen Intentionen und die sich ergebenden Intentionsinterferenzen klar und wählt dementsprechend sein Handeln aus. Erwartungssicherheit beruht auf der Annahme, dass die Handlungsmöglichkeiten der Akteure gleich bleiben. Doch Richtgrößen der Handlungswahl (Nutzengesichtspunkte, Bezugsgruppennormen, Emotionen, normative Selbstansprüche etc.) können sich jederzeit ändern. Auch Verträge werden hin und wieder gebrochen. Doch während in Beobachtungs- und Beeinflussungskonstellationen das abweichende Handeln stets mit einkalkuliert werden muss und daher eine gewisse Dauerwachsamkeit an den Tag gelegt werden muss, können Akteure nach Abschluss einer bindenden Vereinbarung darauf verzichten. Verhandlungskonstellationen zielen darauf ab, dass die Akteure nach Abschluss der bindenden Vereinbarung *von strategischem Sondierungs- und Reflexionsaufwand entlastet* werden. Genau das ist die Funktion und *Logik* bindender Vereinbarun-

[30] Möglich ist auch die Ausdifferenzierung einer Verhandlungskonstellation innerhalb einer größeren Beobachtungs- und Beeinflussungskonstellation als Teilgruppe.

[31] Das ist nicht selbstverständlich: Unter bestimmten Umständen fahren Akteure in einer Konstellation ohne Verhandlungen besser. Diese erfordern schließlich auch einen nicht unbeträchtlichen Aufwand.

gen: Weil sie für alle Seiten bindend sind, kann man sich auf sie verlassen und Wachsamkeit absenken.

Bei der Frage, warum sich Akteure in der Regel an getroffene Vereinbarungen halten, stößt man auf ein Bündel von sich gegenseitig stützenden Faktoren.

Akteure halten sich an Vereinbarungen, die für sie relativ vorteilhaft sind (Homo Oeconomicus). Im Sinne des „satisficing“ strebt der Akteur nicht nach einer Maximierung seines Nutzens, wohl aber nach einer einigermaßen zufriedenstellenden Vereinbarung. Wichtig ist also, dass die Vereinbarung sich nicht nur für den Akteur selbst, sondern auch für die übrigen Beteiligten einigermaßen lohnt: nur dann werden sich alle “satisficer” daran halten. Der Nützlichkeitsaspekt ist an die begrenzte Rationalität des Homo Oeconomicus gekoppelt.

Verstärkt wird die auf Nutzenerwägungen beruhende Bindungskraft noch durch die Beimischung anderer Handlungsantriebe: z.B. Sympathie (wenn man sich sympathisch findet, bricht man Vereinbarungen nicht so schnell) und Ehrlichkeit (Gewissensbisse halten von Vertragsbruch ab). Verhandlungskonstellationen können also dazu dienen, sich gegenseitig als ehrliche Menschen (emotional man) in ihren Identitäten (Identitätsbehaupter) zu bestätigen.

Auch Normkonformität kann die Bindungskraft erhöhen (Homo Sociologicus): Es gehört sich einfach nicht, getroffene Vereinbarungen zu brechen! Wenn der Druck der Bezugsgruppe ausreichend stark ist, zeichnen sich normative Erwartungen durch eine hohe Enttäuschungsfestigkeit aus. Man hält auch dann noch an ihnen fest, wenn der gegenüber sie verletzt hat.

Das Ziel, Intentionsinterferenzen mit anderen Akteuren besser zu bewältigen, muss nicht notwendigerweise mit einer bewussten Gestaltung sozialer Strukturen einhergehen. Bindende Vereinbarungen können rein punktuelle Handlungsabstimmungen ohne Bindungswirkung sein, die keine normative Erwartungsstruktur zur Folge haben. Deagegen geht es beispielsweise politischen Parteien in ihrem Wahlprogramm oft um die Schaffung einer für alle verbindlichen Deutungsstruktur.

5.3.4 Die Verknüpfung der Konstellationsarten

In den drei Konstellationsarten laufen unterschiedliche Arten von sozialen Dynamiken mit unterschiedlichen strukturellen Effekten ab. Beobachtungskonstellationen beruhen darauf, dass Akteure einander lediglich wahrnehmen und ihr Handeln aneinander anpassen. In Beeinflussungskonstellationen beobachten sich die Beteiligten nicht nur, sie bemühen sich darüber hinaus durch den Einsatz von Einflusspotentialen um die Fügsamkeit des/der anderen. In Verhandlungskonstellationen beobachten und beeinflussen sie sich gegenseitig – mit dem Ziel, bindende Vereinbarungen zu treffen.

Jede Konstellationsart kann Erwartungs-, Deutungs- und Konstellationsstrukturen aufbauen, erhalten, verändern. Dies wird jedoch unterschiedlich stark avanciert: Beeinflussungskonstellationen produzieren avanciertere Strukturen als Beobachtungskonstellationen, Verhandlungskonstellationen avanciertere als Beeinflussungskonstellationen. Das liegt daran, dass sie *zunehmend voraussetzungsvoller* aufgebaut sind. Die drei Konstellationsarten lassen sich weitgehend

unabhängig voneinander betrachten, denn sie liegen nicht auf der gleichen Ebene, sondern sind aufgeschichtet.

Nach Schimank sind reale Akteurkonstellationen immer Gemengelagen aller drei Konstellationsarten. Sie gehen teils zeitlich ineinander über, teils koexistieren sie simultan. Mit einer Konstellationsart bekommt man lediglich den Ausschnitt der sozialen Wirklichkeit in den Blick, der das jeweilige theoretische Modell ermöglicht. Diese *Komplexitätsreduktion* ist aber gerade die Funktion von theoretischen Modellen: vereinfachende und genau dadurch auch verallgemeinerbare Kausalzusammenhänge und Ablaufmuster herauszuarbeiten.

Der am häufigsten zu beobachtende Mischtyp ist eine Beobachtungskonstellation mit eingebauter Beeinflussungskonstellation. Er ergibt sich immer dann, wenn in einer Konstellation, die ansonsten durch wechselseitige Beobachtung geprägt ist, ein Akteur oder eine Gruppe erstens über ein überlegenes Einflusspotential verfügt und zweitens ein Interesse daran hat, Einfluss auszuüben, also über die Beobachtung hinaus die anderen zur Fügsamkeit zu bewegen. Ist dies erfüllt, wird die Beobachtungskonstellation durch eine Beeinflussungskonstellation überformt. Ebenfalls immer wieder anzutreffen ist eine Verhandlungskonstellation mit eingebauter Beeinflussungskonstellation. Sie tritt z.B. auf bei der Verhandlung zwischen zwei Akteuren, die beide in ihrer Verhandlungsführung durch einen dritten Akteur (als Schlichter) beeinflusst werden. Bei beiden Typen wirkt sich die Konstellationsmischung auf die Dynamik der Konstellation aus.

Verhandlungskonstellationen schaffen für die moderne Gesellschaft die vielleicht folgenreichste (und komplizierteste) soziale Erfindung: korporative Akteure in Gestalt von Interessen- und Arbeitsorganisationen. Damit schiebt sich, so Luhmann, zwischen Interaktion auf der einen und Gesellschaft auf der anderen Seite eine mittlere Ebene sozialer Handlungszusammenhänge. Die Organisationsebene zeichnet sich dadurch aus, dass hier handlungsprägende soziale Strukturen (Erwartungs-, Deutungs- und Konstellationsstrukturen) aufgebaut erhalten und verändert werden, die oftmals auch handlungsfähig sind, also Akteure darstellen. Organisation sind damit Zwischenwesen: sowohl soziale Strukturen als auch Akteure – und stehen somit oft zwischen individuellen Akteuren und sonstigen sozialen Strukturen. *Korporative Akteure* definieren sich dadurch, dass sie mittels bindender Vereinbarungen intentional produziert und reproduziert werden, im Gegensatz zu kollektiven Akteuren, die ohne sie auskommen. Eine Konstellation individueller Akteure ist in dem Maße ein überindividueller Akteur, wie die Handlungen der Einzelnen ein konstruktiv geordnetes Ganzes ergeben, also nicht bloß gelegentlich, sondern systematisch so aufeinander aufbauen, dass eine übergreifende Zielsetzung verfolgt wird. Hieran wird auch klar, warum gerade Verhandlungskonstellationen überindividuelle Akteure konstituieren können. Denn bindende Vereinbarungen können u.a. dazu benutzt werden, ein auf ein Ziel ausgerichtetes Ganzes aufzubauen.

Zwei Arten korporativer Akteure gibt es: Koalitionen und formale Organisationen. Koalitionen sind der weniger weit entwickelte Typus mit meist nur kurzer, manchmal sogar von vornherein befristeter Lebensdauer. Koalitionen haben mit Organisationen die Konzertierung des Handelns der individuellen Beteiligten über bindende Vereinbarungen gemeinsam. Korporative Akteure entsprin-

gen den Bemühungen individueller Akteure, das je einzelne Einflusspotential durch Bündelung zu steigern. Das heisst, dass hier Verhandlungskonstellationen mit Blick auf Beeinflussungskonstellationen stattfinden. Formale Organisationen sind einflussstärker als eine Koalition, da sie auf längere Dauer angelegt ist und stärker über ihre Mitglieder verfügen können. Formale Organisationen sind in der modernen Gesellschaft die einflussstärksten Akteure überhaupt. Wir betrachten Sie daher im folgenden Abschnitt.

5.4 Organisationstheorie: strukturierte Handlungsfelder

In der Organisationsforschung galten Organisationen lange Zeit als zielorientierte, rationale und geplante Systeme (vgl. Türk, 1989, 23) – sie wurden gleichgesetzt mit ihren Formalstrukturen. Organisationen werden nach dieser Auffassung auf eine gegebenes Ziel hin entworfen. So lautet die Definition einer Organisation nach dem Soziologie-Lexikon: „Organisationen sind tendenziell auf Dauer angelegte soziale Einheiten, mit institutionalen Regeln, die das Verhalten der Beteiligten steuern und mit spezifischen Regeln und Aufgaben, die durch die Mitglieder realisiert werden sollen.“ Organisationen existieren, um Probleme zu lösen. Sie bestehen aus vielen Akteuren, sind in vielen Aktivitäten involviert, sind zielgerichtet, umweltbeeinflusst und -beeinflussend, besitzen (unabhängig von den Akteuren) Wissen, Fähigkeiten, Kultur, Gedächtnis und sind juristisch existent.

Die konkrete Ausgestaltung einer Organisation zu einer Aufgabe hängt von verschiedenen vielen Faktoren ab. Folgt man Carley und Gasser (1999), dann existieren viel zentrale Faktoren: Die Perspektive der Aufgaben, der Akteure, der Strukturen und der verfügbaren Technologien (vgl. dazu auch Kapitel 3.4).

Organisationen können nach den Aufgaben, denen sich eine Organisation stellt, klassifiziert werden. Beispiele für Aufgabenparameter sind der Koordinierungsbedarf, der Grad der Wiederholung, die Dynamik der Umgebung, die Komplexität, der Grad der Spezialisierung und der Ressourcenbedarf. Der konkrete Parametersatz und seine zu erwartende Entwicklung über die Zeit bestimmt, welche Organisationsformen sich positiv auf die potentielle Bearbeitbarkeit auswirken. Hierbei spielt die Umgebungsdynamik eine große Rollen, denn die erforderlichen Reaktionszeiten schließen von vorherein gewisse Organisationsstrukturen aus. Eine Organisation ist nicht losgelöst von den Akteuren zu betrachten, denn welche Technologien zum Einsatz kommen können, hängt vom Wissen und den Fähigkeiten der Akteure ab. Bei den Betrachtungen spielt nicht zuletzt noch das herangezogene Optimalitätskriterium (maximale Effizienz, geringes Risiko, minimale Kosten, maximalen Gewinn oder optimale Qualität) eine Rolle.

Organisationsstrukturen definieren sich klassischerweise anhand eines Netzwerkes. Die Knoten dieses Netzwerks bilden hierbei die *Positionen*, die definieren, welche Rollen der Positionsinhaber einnehmen kann bzw. muss, welche Ressourcen er mobilisieren kann usw. Akteure werden zu Organisationsmitgliedern, indem sie Positionen besetzen, wozu sie die zur Erfüllung der Position

notwendigen Rollenfähigkeiten besitzen müssen. Technologien sind von der Umwelt bereitgestellte Mechanismen, die sich eine Organisation prinzipiell nutzbar machen kann, vorausgesetzt ihre Akteure sind in der Lage, diese zu verwenden, z.B. komplexe Maschinen. Technologien bestimmen, wie organisationale Absichten operationalisert werden.

5.4.1 Organisationstheorien

Organisationstheorie steht unter dem Vorzeichen einer starken Polarisierung: auf der einen Seite die strukturalistischen Ansätze, die eine Organisation unter dem Gesichtpunkt ihres strukturellen Aufbaus, in den sich die Akteure eher passiv einfügen, betrachten; auf der anderen Seite die interaktionistischen Ansätze, die eine Organisation von den Akteuren und ihren Interaktionen heraus begreift.

Die organisationale Realität in den USA wurde im 20. Jahrhundert von rasch expandierenden Industriebetrieben dominiert. Mit zunehmendem Wachstum wurde auch das Problem ihrer organisatorischen Beherrschung in Hinblick auf größtmögliche Effizienz immer drängender. Organisationstheorie entwickelte sich in der Unternehmenspraxis. Der Weg in die Wissenschaft und zu einem einheitlichen Theoriekonzept, das über die Behandlung gerade aktueller Einzelprobleme hinausging, war lang. Organisationstheorie und Unternehmensführungslehre waren über alle Stadien der Theorieentwicklung hinweg stets eng miteinander verknüpft.

In Deutschland entwickelte sich auf der einen Seite die Betriebswirtschaft mit rein instrumentellen Organisationsvorstellungen und technokratischem Weltbild. Auf der anderen Seite entstand davon unabhängig eine Organisationssoziologie, die im wesentlichen einer gesellschaftskritischen Industriesoziologie entsprang, es aber zunächst nicht zu einer beachtenswerten Eigenständigkeit brachte. Damit stand, überspitzt gesagt, eine Managementlehre ohne institutionelle Organisationsvorstellung einer Organisationssoziologie gegenüber, die die betriebliche Institution Management am liebsten abgeschafft sähe.

Wir geben im folgenden eine Übersicht über die Hauptströmungen und ihren zentralen Theorieannahmen. Es handelt sich dabei im einzelnen um die Theorien: Theorie der bürokratischen Organisation, Scientific Management, Human Relationship, Verhaltenswissenschaftliche Entscheidungstheorie, Kontingenztheorie, Mikropolitik und Neoinstitutionalismus. Für eine weiterführende Beschäftigung sei (Kieser, 1999) und auch (Scott, 1986; Türk, 1989; Gmür, 1993; Ortmann u. a., 1997; Morgan, 1997) empfohlen.

Die bürokratische Organisation

Die Arbeiten zur Organisationstheorie beginnen bei Max Webers Arbeit zur bürokratischen Organisation, bei der insbesondere die Herrschaftsformen – charismatisch, traditionell oder legalistisch – im Vordergrund stehen. Die bürokratische Verwaltung steht im Zentrum der Betrachtung, da sie nach Weber die rationalste Form der Herrschaft darstellt, denn Organisationen und Institutionen bilden die Grundpfeiler, um die soziale Welt der Wissenschaft, Technik, Politik berechenbar und beherrschbar zu gestalten.

Scientific Management

Aus der angelsächsichen Schule stammt der Ansatz von Frederick Winslow Taylor (1856–1915) zum *Scientific Management*, bei der die effiziente Bearbeitung von Aufgaben im Vordergrund steht. Taylor arbeitet hier drei zentrale Leitaspekte heraus: Erstens die Aufgabenteilung, die auf der Zerlegung komplexer in einfache Tätigkeiten beruht, zweitens die Kontrolle der Durchführung und drittens die Planung und Steuerung durch die Organisationsleitung. Diese Sichtweise ist stark von der industriellen Massenproduktion, insbesondere in der Automobilindustrie, geprägt, in der es um die günstige Produktion am Fließband geht. Die Organisationsmitglieder, speziell die Arbeiter, werden in diesem Modell gezielt von Entscheidungenszwängen befreit und auf die Ausführung einfacher, gleichförmig wiederkehrender und daher leicht zu erlenender Tätigkeiten reduziert – gewissermaßen das Gegenmodell zum kreativ arbeitenden Handwerker.

Human Relationship

Als Gegenbewegung der rationalisierten, funktionalistischen Sicht entwickelte sich die *Human Relationship-Bewegung*. Sie nahm ihren Ausgang in einer empirischen Untersuchung in den Hawthorne-Werken der Western Electric Company, durchgeführt von Fritz Jules Roethlisberger, William John Dickson und Elton Mayo. Die Studie zeigte, dass die Reduktion der Arbeiter auf die Exekution festgelegter Schritte die Produktivität senkt, da diese Rolle demotivierend wirkt. Die Human Relationship-Bewegung stellt daher mit dem menschlichen Faktor, die soziale Interaktion und das persönliche Erleben und Empfinden der Organisationsmitglieder, kurz: die informelle Organisation in den Fokus der Betrachtung.

Verhaltenswissenschaftliche Entscheidungstheorie

Die *Entscheidungstheorie* befasst sich mit den Prozessen der Entscheidungsfindung in Organisationen. Organisationen werden hierbei als zweckorientierte Handlungssysteme verstanden, die ihren Mitgliedern Anreize bieten, an der Erreichung der Organisationsziele mitzuwirken. Die zentrale Annahme ist, dass Akteure sich *innerhalb ihrer Einschränkungen* rational verhalten. Es wird also nicht die Rationalitätsannahme verworfen, sondern auf die einschränkenden Randbedingungen geachtet.

Ein rationaler Akteur hat perfekte Information und unterliegt keinerlei Zeitbeschränkungen. Dieser Annahme setzt Herbert Alexander Simon (1916-2001) das Konzept der *bounded rationality* entgegen, die annimmt, dass sich Akteure aufgrund von beschränkter Zeit oder aufgrund von unvollständiger Information nicht optimal verhalten. Sie streben nicht die optimale Lösung an, sondern stattdessen unter Einsatz von Heuristiken eine für den Akteur zufriedenstellende (engl. satisficing). Organisationen dienen dazu, die Einschränkungen von Akteuren zu überwinden und die daraus resultierenden Suboptimalitäten zu kompensieren. Akteure haben zudem eine begrenzte Lebensdauer, wohingen Organisationen langfristige Aktivitäten absolvieren können.

Organisationale Regelungen sind somit ein rationaler Mechanismus, der die Akteure einerseits einschränkt, indem er ihnen einige, meist grundlegende Entscheidungsmöglichkeiten nimmt, sie andererseits aber gleichzeitig dadurch erst in die Lage versetzt, sich in der konkreten Situation in dem verkleinerten Entscheidungssuchraum zu orientieren. Regeln dienen somit der Komplexitätsreduktion. Simons Theorie hatte dabei stets einen direkten Bezug zur Computersimulation, die einen engen Bezug zur künstlichen Intelligenz aufweist.

Ein Pendelschlag in die andere Richtung, d.h. weg von dem Rationalitätsglauben beschreiben Cohen u. a. (1972), die Irrationalität als Handlungsmotivation unterstellen und das Lösen von Problemen als zufälligen Ablauf beschreiben. In diesem Zusammenhang wurde von ihnen das *garbage can* Modell entwickelt, das den Aspekt der beschränkte Sicht der Akteure so ausweitet, das Akteure, Probleme und Entscheidungen frei fließend in Kombinationsprozessen eher zufällig aufeinandertrieffen.

Kontingenztheorie

Die *Kontingenztheorie* verschiebt den Fokus von der Entscheidungsfindung in einer Organisation hin zur koordinativen Wirkung der Organisationsstruktur selbst. Organisationsstrukturen werden in Hiblick auf ihren Aufbau und ihre Wirkung betrachtet. Wesentliche Aspekte sind hierbei die Form der Spezialisierung und der Arbeitsteilung, die Delegationsstrukturen, die Koordinationswirkung der Regeln sowie der Formalisierungsgrad. Aus dieser betriebswirtschaftlich orientierten Forschungsrichtung werden verschiedene Koordinationsformen untersucht, die Koordination durch Pläne oder durch Zielvorgaben; die Arbeit in selbstverantworlichen Teams oder in hierarchische Anweisungsstrukturen; die Wirkung von *corporate indentities* und Unternehmenskulturen usw. Wichtig sind hier auch die Strukturen selbst: Linienorganisation sind baumartige Hierarchien; Staborganisationen kombinieren Linienorganisationen um den Aspekt der beratenden Planungsfunktion ohne Weisungskompetenz; funktionale Organisationen strukturien sich nach den Aufgaben (beispielsweise Entwicklung, Produktion, Verwaltung und Vertieb), wodurch sich einerseits eine klare Trennung bezüglich der Aufgaben ergibt, andereseits aber sachbezogene Überschneidungen in unterschiedlichen Teilen der Organisation existieren; die Matrixorganisation geht davon aus, dass beide Dimensionen – Funktionalität und Objekte – gleichberechtigt sind und ordnet daher jeder möglichen Kombination einen Platz in der Organisation zu.

Institutionenökonomie

Die *Institutionenökonomie* behandelt den koordinativen Ansatz der Organisation und erweitert ihn um den Aspekt, dass Organisationen nicht nur die Komplexität der Entscheidungsfindung reduzieren, sondern auch den Zweck haben, die sogenannten Transaktionskosten eines Unternehmens zu minimieren. Transaktionskosten sind Nebenkostens eines Vertrags, die zum einen im Vorfeld des Vertrages entstehen, beispielsweise als Verhandlungskosten, zum anderen im

nachhinein, beispielsweise als Kosten, die enstehen, um den Vertrag durchzusetzen und sich gegen das Risiko der Nichteinhaltung zu versichern.

Mikropolitik

Der *Mikropolitischen Ansatz* interpretiert das Handlungssystem einer Organisation nicht unter der Blickwinkel der Rationalität, sondern unter der Perspektive der Machtbeziehungen. Macht äußert sich zum einen in den Weisungsbeziehungen der Akteure (formale Macht), zum anderen aber auch in den Handlungsspielräumen der Akteure, d.h. in den Bereichen, die von den orgaisationalen Regeln nicht erfasst werden (die frei fließende Macht). Macht lässt sich nur vermehren, wenn man sich startegisch verhält, Koalitionen schmiedet, sich also politsch – genauer: mikropolitisch – verhält. Nach Michel Crozier und Erhard Friedberg finden diese mikropolitischen Machtkämpfe in Form von Spielen statt (vgl. Crozier und Friedberg, 1993). Die Organisation ergibt sich als die Gesamtheit ihrer Spiele, deren Verzahnung und den Spielregeln. Die Organisationsmitglieder entwickeln dabei Strategien, die sie einsetzen, um ihre Interessen durchzusetzen (siehe dazu auch Bosetzky, 1992). In den organisationalen Machtspielen vereinen sich die strukturelle mit der handlungstheoretischen Sichtweise, da hier die Spielregeln mit den Akteursstrategien wechselwirken und sich gegenseitig beeinflussen.

Neoinstitutionalismus

Institutionen sind (auch in Abgrenzung zum Begriff der Organisation) als ein System von Regeln (einschließlich der Vorkehrungen zu deren Anwendung, Durchsetzung etc.) zu verstehehen. Im Neoinstitutionalismus werden, in Abgrenzung zum klassischen Institutionalismus, neben den formalen Institutionen auch nicht-formale betrachtet. Institutionalisierung ist der Prozess, bei dem soziale Beziehungen vom subjektiven Status in den objektiven wechseln, und damit aus einem kontingenten, sozial konstruierten Zustand in einen nicht mehr zu hinterfragenden (vgl. Berger und Luckmann, 1997).

Die Erkenntnis, dass die Wirklichkeit sozial konstruiert wird, wird im Neoinstitutionalismus auf Organisationsstrukturen angewendet. Der Neoinstitutionalismus (March und Simon, 1989; Powell und DiMaggio, 1991; Scott, 1995) wendet sich gegen individualistische Erklärungsansätze, die Entscheidungen als (beschränkt) rationale handlungswahlen auf subjektive Nutzenerwartungen der Akteure zurückführen, und Institutionen nur die Aufgabe haben, diese Handlungswahl günstig zu steuern (vgl. Edeling, 1999, S. 8).

Stattdessen, so die zentrale These, haben Institutionen ein Eigenleben. Sie entwickeln sich in Organisation nicht mit dem Ziel, für die Aufgabenbewältigung optimale Rahmenbedingungen zu schaffen, sondern sie entwickeln sich stets synchron mit den Strukturen der Umwelt. Die Organisation reagiert auf die Umwelt, adaptiert diese und rechtfertig hierdurch ihre Existenz. Organisationen gleichen sich somit einander an, mit dem Ergebnis der institutionellen Isomorphie. Somit sind nicht die Ziele die Antriebskraft der Veränderung, sondern die Umgebung. Die Formen der Anpassung sind daher – überspitzt formuliert – eher zufäl-

lig, als dass sie von den externen Umgebungsfaktoren, nicht aber von internen Zielvorgaben abhängen. Dies ist im Konzept der Pfadabhängigkeit formuliert, das besagt, dass die Organisationsentwicklung nur mit der Umgebungsdynamik, nicht aber aus ihren Zielen heraus geklärt werden kann.

Durch die Institutionalisierung erscheinen die durch Adaption erstellten Regeln den Akteuren aber so, als wären die so generierten institutionellen Regelungen so und nicht anders notwendig. Man spricht in diesem Zusammehang von der Mythenbildung und einer Rationalitätsfiktion.

5.4.2 Formale und informelle Organisation

In den vier Perspektiven – Aufgaben, Akteure, Strukturen und verfügbare Technologien – vermischen sich sowohl die formalen als auch die informellen Aspekte der Organisation. Die *formale Organisation* besteht aus dem Netzwerk der Positionen und den assoziierten Rollen, während die *informale Organisation* aus dem Netzwerk der Akteure besteht. Das Wechselspiel der beiden Aspekte charakterisiert die Organisationsdynamik. Formale Strukturen bezeichnen im allgemeinen den offiziellen, kodifizierten Teil der Organisation, der oft mit Regeln, Verfahren oder Vorschriften gleichgesetzt wird, wohingegen informelle Strukturen meist die offiziell nicht vorgesehenen oder sogar heimlichen und unerlaubten Praktiken der Organisation umschreiben.

Setzt man die Kategorien formal/informell aber in dem Bestreben ein, Organisationen verstehen zu wollen, so stößt man schnell an die Grenzen ihrer Erklärungskraft. Typisiert man z.B. eine Organisation als Formalorganisation, so führt dies sofort zu einer Überbetonung der offiziellen Regeln und ihrer Wirkung sowie zu einer Unterschätzung oder Missachtung der ungeplanten und unerlaubten Praktiken. Genauso ist es im umgekehrten Fall. Dies liegt daran, dass durch eine Einordnung in die Kategorien formal/informell die Tatsache weitgehend unberücksichtigt bleibt, dass so getrennt wird, „was in der Realität untrennbar und unentwirrbar verbunden ist“ (Friedberg, 1995, 144). In Wirklichkeit existiert die Formalstruktur in Abhängigkeit von den Verhaltensweisen und Praktiken, die sie zu regeln versucht. Die formalen Strukturen erlangen nur in dem Maße Wirksamkeit, wie sie in eben die real stattfindenden Verhaltensweisen und Praktiken der Akteure aufgenommen werden.

Das Wissen darüber, dass in Organisationen jedoch mehr Kräfte am Werk sind als mit solch einer funktionalen Sichtweise wahrgenommen werden können, kam mit der Human Relationship-Bewegung in den 1930er Jahren hinzu.[32] Die

[32] Auch in der Informatik findet man die Grundlinien dieser Debatte. So kontrastiert Rolf (1998) in diesem Zusammenhang die Leitbilder der Fabrik und der Werkstatt – und fragt nach ihren ethischen Implikationen: In einer Fabrik werden den Akteuren von außen die Arbeitsabläufe aufgeprägt, sie sind nicht Handelnde, sondern potentielle Schachstellen in einem übergeordneten, meist durch geplanten Arbeitsablauf der formalen Organisation, dessen Erfüllungsgehilfe sie sind, ohne Wissen um die Abläufe, in die sie eingebunden sind, da die an anderer Stelle geschieht. Im Gegensatz dazu steht das Leitbild der Werkstatt: Eine Werkstatt erlaubt es kompetenten und ihrer selbst bewußten Akteuren gesetzte Ziele eigenverantwortlich zu lösen. Dazu benötigen sie geeignete Werkzeuge und Materialien, die in der Werkstatt bereitgestellt werden. Sachverstand ist notwendig, die Planung geschieht durch die Ausführenden selbst.

Kategorie der informellen Strukturen und Gruppen wurde eingeführt und mit ihnen z.B. auf die persönlichen Befindlichkeiten der Arbeiter geschaut (vgl. z.B. die überblicksartige Darstellung in Kneissler, 1996). Seither lassen sich in der Organisationstheorie zahlreiche Debatten verfolgen, die sich mit formalen und informellen Organisationsanteilen und deren Zusammenhang befassen. Nachzulesen sind z.B. Aussagen, die von informellen Strukturen als einer Parallelwelt sprechen, die unabhängig neben der Welt der Formalstrukturen in Organisationen existiert. Andere wiederum sprechen von einer*wechselseitigen Bedingtheit* oder gar einer untrennbaren Verknüpfung beider.

Tatsächlich sind Formalstrukturen das Ergebnis von Regelsetzungen oder Verhandlungen der Organisationsmitglieder bzw. -leitung und drücken dieses in kodifizierter Form aus. Formale Vorschriften werden aber ständig von den Praktiken der Beteiligten „überrollt“, indem jene versuchen, Zwänge zu umgehen und Situationen aus- und umzudeuten. Einige Beispiele: Die tatsächliche Arbeit weicht von der vorgeschriebenen ab, der festgelegte Dienstweg wird umgangen, Entscheidungsprozesse verlaufen nur teilweise nach Plan. Ständig sind die Akteure damit beschäftigt, die Gültigkeit des formalen Rahmens zu verschieben (Friedberg, 1995, 144).

Ordnet man eine Organisation in die Kategorie formal ein, weil man meint, die Regelungsdichte durch formale Vorschriften könnte höher nicht sein, so wird das Ergebnis der Analyse dennoch nicht mehr als eine vage Annäherung an die Organisation und ihre Funktionsweise sein. Genau dieser Fall trifft auf die von Cohen, March und Olsen empirisch untersuchten Universitäten zu, was sie zur Entwicklung des Konzepts vom „Garbage Can“ motivierte.

In der Realität ist das, was das reale Organisationsgeschehen prägt, ein Mischprodukt aus formalen Vorschriften und informellen Abläufen. Setzen wir für formale Vorschriften einmal den Begriff der *Regel* ein und für informelle Abläufe den Begriff der *Praxis*, dann ist das, was im Organisationsalltag passiert, die praktische Ausformung der Regeln.

5.4.3 Der strategische Ansatz von Crozier/Friedberg: Theoretische Einordnung und Kernkonzepte[33]

Strukturelle und interaktionistische Ansätze stehen einander unvereinbar gegenüber. Sie berücksichtigen im allgemeinen nicht die Dualität von Handlung und Struktur, so daß die verschiedensten Theorien, ob aus dem Bereich der BWL oder aus der Akteurstheorie, sich den durch die Betrachtung von öffentlichrechtlichen Institutionen entehenden Fragestellung nur einseitig zuwenden können. Eine sozionische Organisationstheorie wird daher vor dem Hintergrund der Dualismen *Individuum und Gesellschaft* sowie *Struktur und Handlung* zu formulieren sein, was dazu führt, daß wir diese Theorien speziell auf dem Hintergrund der Fragestellung der Entstehung, Wirkung und wechselseitiger Bedingtheit dieser Handlungs- und Interaktionsmuster betrachten werden. Wir betrachten nun Organisationsanalyse nach Crozier/Friedberg, da diese es sich zum Ziel gemacht beide Perspektiven mit Hilfe des Spielkonzeptes zusammenzuführen.

[33] Dieser Abschnitt basiert auf der gemeinsamen Arbeit mit meiner Kollegin Daniela Spresny und stellt eine Überarbeitung von (Köhler u. a., 2003d) dar.

Der Ansatz der strategischen Organisationsanalyse von Crozier/Friedberg gehört der mikropolitischen Forschungsrichtung der Organisationstheorie an. Die strategische Organisationsanalyse betrachtet Organisationen als eine Gesamtheit und zugleich als Ergebnis einer Reihe von Spielen (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 68-69). Diese Spiele werden von den Organisationsmitgliedern gespielt, finden also auf der Mikroebene der Betrachtung von Sozialität statt. Die Organisationsmitglieder entwickeln dabei Strategien, die sie einsetzen, um ihre Interessen durchzusetzen.

Da ein interessengeleitetes und strategisches Handeln in Organisationen meist nur möglich ist, wenn man mit anderen Akteuren zusammenarbeitet und kollektive Handlungsweisen entwickelt, geht es Crozier/Friedberg um die Analyse menschlicher Beziehungen in konkreten organisationalen Handlungszusammenhängen. Die zentralen Fragen lauten: Unter welchen Bedingungen und verbunden mit welchen Möglichkeiten bzw. Zwängen ist organisationales Handeln möglich? Zu welchen Mitteln und Instrumenten greifen die Akteure, um Probleme im Kontext „Organisation“ zu lösen? Besonderen Wert legen die Autoren auf die Kopplung und Wechselwirkung zwischen Akteuren und dem System Organisation, in dem sie sich bewegen. Außerdem stellen sie als empirischen Bezugspunkt das Erleben der Akteure in konkreten organisationalen Handlungszusammenhängen in den Mittelpunkt ihrer Herangehensweise.

Crozier/Friedberg beschreiben ihre Herangehensweise als eine Dualität von strategischem und systemischem Denken: Das *strategische* Denken geht von der konkreten Erfahrung und dem Erleben der Akteure aus, um von hier aus die relevanten Merkmale des Systems zu entdecken zu können. Dabei geht es in erster Linie um das Aufdecken von in der Organisation bestehenden sozialen Beziehungen, Machtverhältnissen und Zwängen, die das Verhalten der Akteure bedingen. Das *systemische* Denken geht vom System (gemeint ist das organisationale Handlungssystem), seiner Struktur, seinen Regeln und Zielen aus, die das Verhalten der Akteure in bestimmte Bahnen lenken (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 3). Diese beiden Sichtweisen sind, so Crozier/Friedberg, untrennbar miteinander verknüpft und führen nur in der Kombination zu weitreichenden und realitätshaltigen Erklärungen. Eine Sichtweise allein würde in reduktionistischer Weise jeweils eine Sicht überbetonen und die andere vernachlässigen: Die systemische Logik würde die Organisation auf ein strukturiertes und zwingendes Gebilde reduzieren, ohne die Einflussmöglichkeiten der Akteure zu beachten, während die strategische Richtung die Freiheit und Intentionalität der Akteure überbetonen würde und übersehen müsste, dass es kein nicht-strukturiertes Handlungsfeld gibt.

In den folgenden Abschnitten soll der strategische Ansatz der Organisationsanalyse anhand von vier zentralen Themen bzw. Konzepten charakterisiert werden. Als solche werden – weitgehend übereinstimmend mit Küpper und Felsch (2000, 15ff.) – angesehen: *strukturierte Handlungssysteme Spiele*, *Strategien* und *Macht*.

Die strukturierten konkreten Handlungssysteme der Organisation

Crozier/Friedberg kommen an der Stelle noch einmal auf die Verknüpfung der strategischen und der systemischen Denkweise zurück, an der sie von den Strategien zum System Organisation übergehen (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 131-147).

Strategische und systemische Denkweise setzen sich gegenseitig voraus und sind sowohl schwer auseinanderzuhalten als auch schwer einander anzunähern. Damit dies aber gelingen kann, ziehen die Autoren den Spielbegriff als sozialen Integrationsmechanismus heran. „Die beiden widersprüchlichen Orientierungen, die der egoistischen Strategie des Akteurs und die der zweckgebundenen Kohärenz des Systems, sind hier zusammengehalten, aber nicht vereint. Die eine gilt für das Verhalten der Akteure im Spiel und die andere für die Spielergebnisse“ (Crozier und Friedberg, 1993, 138).

Wenn es also z.B. die Analyse erlaubt, ausreichend gekennzeichnete Machtbeziehungen zwischen den Akteuren aufzudecken, so kann daraus gefolgert werden, dass relativ stabile Strategien vorhanden sind. Von diesen ausgehend ist es dann möglich, Hypothesen über die diesen Strategien ihre Rationalität verleihenden Spiele und über das diese Spiele enthaltende System aufzustellen. Das Postulat dieser Überlegungen lautet, dass es keine Macht ohne Strukturierung geben kann und dass Strukturierung Regulierung voraussetzt. Der Gegenstand einer solchen Analyse wird als *konkretes Handlungssystem* bezeichnet.

Empirisch aufdecken und in einer vergleichenden Perspektive untersuchen lassen sich etwa folgende potentielle Merkmale und Eigenschaften konkreter Handlungssyteme (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 145-146):

- Grad der Fragmentierung und Abschottung zwischen den Teilen des Handlungssystems (im Vorteil befinden sich diejenigen Akteure, die sich an Knotenpunkten des Systems befinden);
- Vorherrschende Kommunikationsweisen im System (viele Handlungssysteme zeichnen sich durch Geheimhaltung und Nicht-Kommunikation aus, überall gibt es Kommunikationsbeschränkungen). Eine Analyse sollte erhellen, wer im einzelnen mit wem warum über welche Kanäle und Hierarchieebenen hinweg kommuniziert;
- Grad der Strukturierung (wie sind die Spiele organisiert, gegliedert und hierarchisch angeordnet?);
- Grenzen des konkreten Handlungssystems und Überschneidung von Handlungssystemen (hier geht es um das Ausmaß, in dem ein System nach innen und außen offen ist; das Ausmaß bedingt den Einbezug oder den Ausschluss von außen stehenden Akteuren und die Möglichkeit der Akteure, innerhalb des Systems zwischen Spielen zu wechseln).

Worum es also geht, ist der Beweis der Existenz des konkreten Handlungssystems und dessen Analyse. Zu berücksichtigen, aber der Vorgehensweise selbst auch schon implizit, ist, dass das Handlungssystem keine natürliche Gegebenheit darstellt, sondern ein kontingentes Konstrukt. Der organisationsanalytische

Ansatz von Crozier/Friedberg will sich diesem Problem widmen und es lösen, indem er das konkrete Handlungssystem aufdeckt, dessen Eigenschaften analysiert und dabei auch den kontingenten, weil sozial konstruierten und veränderlichen Eigenschaften Rechnung trägt.

Das zu analysierende Handlungssystem ist als soziales Konstrukt immer auch eine prekäre und problematische Einrichtung einer menschlichen Strukturierung der Handlungsfelder. Sie ist ein Phänomen, das einerseits aus bestimmten Formen von Rationalitäten und Handlungslogiken besteht und andererseits ein Ergebnis von sozialer Kontrolle, die ausgeübt wird, um das (kollektive) Handeln der Akteure in gegebenen Einflussbereichen zu steuern. Dabei ist die Kontingenz im Grunde nichts anderes als die Folge der prinzipiellen Nichtgebundenheit sozialer Handlungssysteme und der Handlungsfreiheit der Akteure (vgl. hierzu die Ausführungen in Crozier und Friedberg, 1993, 167-170).

Das strategische Verhalten der Organisationsmitglieder

Jedem Organisationsmitglied wird eine individuelle Strategie zugeschrieben, die einer subjektiven Rationalität folgt. Das bedeutet, die Akteure setzen sich aktiv mit den Handlungsmöglichkeiten und –zwängen auseinander. Vorausgesetzt wird dabei ein Handlungsfreiraum, der grundsätzlich mehrere Wahlmöglichkeiten beinhaltet. Dieser ist jedoch gleichzeitig begrenzt, und zwar in erster Linie durch die vorherrschenden Machtverhältnisse in der Organisation, die auf einer ungleichen Verteilung von Ressourcen und Fähigkeiten unter den Akteuren beruht. Weder die Einstellungen, Motive und Interessen der Akteure noch deren Handlungspraxis noch die vorherrschenden Macht- und strukturellen Verhältnisse der Organisation sind jedoch unveränderlich gegeben: Sie stehen vielmehr in einem sich wechselseitig bedingenden Beeinflussungsverhältnis zueinander und können sich unter bestimmten Bedingungen anpassen und wandeln. So ist es auch möglich, dass neue Handlungsmöglichkeiten hinzukommen und neue Strategien entwickelt werden. Das ist es letztlich auch, worum es den Akteuren geht: ihren Handlungsspielraum durch den Einsatz entsprechender strategischer Verhaltensweisen zu vergrößern und die eigene Machtstellung zu verbessern.

Mit der Konzeptionierung der Akteursstrategien lösen Crozier/Friedberg gleichzeitig auch ein forschungsmethodisches Problem. Über den Strategiebegriff versuchen sie nämlich, das empirisch beobachtbare Verhalten der Akteure an den Handlungskontext anzubinden und mit Sinn zu belegen. Vorausgesetzt wird dabei, dass das Verhalten der Akteure immer sinnvoll ist, d.h. rational in Bezug auf Handlungsgelegenheiten, den die Gelegenheiten definierenden Kontext sowie in Bezug auf das Verhalten anderer Akteure und die Spiele, die sie mit ihnen spielen. Das gilt auch dann, wenn es dem Akteur nicht bewusst ist. Die Rationalität des Akteurs wird also im organisatorischen Kontext gesucht und aus dem Erleben der Akteure heraus rekonstruiert und verstanden (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 33-34).[34]

[34] Hinzuweisen ist hier auf den grundlegenden Unterschied des Rationalitätsverständnisses von Crozier/Friedberg und dem klassischen Verständnis einer an gesetzten Zielen ausgerichteten Handlungsrationalität.

Die Spiele und ihre Spielregeln

Das Spiel stellt für Crozier/Friedberg das grundlegende Instrument kollektiven und organisierten Handelns dar. Mit dem Spielkonzept wollen die beiden Forscher die die Organisation bestimmenden Beziehungsgeflechte und Abhängigkeitsverhältnisse in einer Weise in den Blick bekommen, die z.B. weit über das von ihnen als allzu deterministisch angesehene Rollenkonzept hinausgeht. Es stellt für sie keine bloße Metapher dar, sondern einen konkreten „Mechanismus, mit dessen Hilfe die Menschen ihre Machtbeziehungen strukturieren und regulieren und sich doch dabei Freiheit lassen“ (Crozier und Friedberg, 1993, 68). Das Spiel ist ein sozialer Mechanismus mit integrierender Kraft: integriert werden im Spiel nämlich die divergierenden und teilweise widersprüchlichen Verhaltensweisen der relativ autonomen Akteure (siehe Crozier und Friedberg, 1993, 4). Freiheit und Zwang werden hier vereint: Der Spieler bleibt zwar grundsätzlich frei in seiner Handlungswahl, wenn er aber gewinnen will, dann muss er auf eine rationale Strategie zurückgreifen, die sich in die Beschaffenheit des Spiels einfügt und dessen Regeln beachtet. Was rational ist, bestimmt das Spiel mit seiner Charakteristik und seinen Regeln.

Crozier/Friedberg schlagen vor, die Organisation als „Ergebnis einer Reihe von Spielen zu betrachten, an denen die verschiedenen Akteure in der Organisation teilnehmen“ (Crozier und Friedberg, 1993, 69). Die Strategien der Akteure sind als Spielweisen zu verstehen. Auch wenn es zu einer gewissen Stabilität in den Spielstrukturen kommen kann, bedeutet dies jedoch nicht, dass die Akteure auf die Beschaffenheit des Spiels keinen Einfluss nehmen können. Die Akteure haben grundsätzlich die Möglichkeit, unter mehreren möglichen eine in ihren Augen passende Strategie auszuwählen und damit das Spiel selbst zu verändern. Sie sind in der Lage, ihr strategisches Feld umzustrukturieren, indem sie die Spieleinsätze und so das Verlustrisiko reduzieren. Oder sie wirken auf das Spiel dadurch ein, dass sie andere verfügbare Ressourcen im Spiel relevant machen und mobilisieren. Oder aber sie hoffen auf eine positive Wendung des Spiels und greifen zu riskanteren Strategien und behalten diese trotz anfänglicher Verluste bei. Kurz: Akteure versuchen, die Beschaffenheit des Spiels zu verändern. Und zu diesem Zweck variieren sie ihre Strategien (z.B. riskant, aggressiv oder defensiv) je nach persönlicher Fähigkeit, Konfiguration der strategischen Felder, Struktur und Spielregeln (siehe hierzu die Ausführungen von Crozier und Friedberg, 1993, 70-71).

Für die empirische Forschungsstrategie sind dabei Abweichungen von der Norm und Unregelmäßigkeiten im Verhalten ausschlaggebender als Regelmäßigkeiten und dominierende Verhaltensweisen. Denn gerade die Abweichungen werden auf die bestehenden Wahlmöglichkeiten verweisen und machen Einwirkungen auf die Logik des Spiels nachvollziehbar. Der Forscher wird mit einer solchen Vorgehensweise dazu angehalten, den Freiraum und die Kreativität der Akteure einzubeziehen. Die Fruchtbarkeit der Konzepte Spiel und Strategie wird an dieser Stelle erneut deutlich: sie ermöglichen eine Forschungsperspektive, die „der Zwanghaftigkeit und Vorstrukturiertheit kollektiven Handelns Rechnung trägt und dabei das menschliche Verhalten als das ansieht, was es ist: Behauptung und Aktualisierung einer *Wahl* aus einer Gesamtheit von Möglichkeiten“

(Crozier und Friedberg, 1993, 72-73, Hervorh. im Original). Crozier/Friedberg betonen damit den sozial konstruierten Charakter jeder Struktur kollektiven Handelns.

Das Spielkonzept ist nicht nur ein Mechanismus der Integration divergierender Interessen und Handlungsweisen. Es koppelt auch – ähnlich wie die Strategien – in vermittelnder Weise den handelnden Akteur mit seinem strukturierten Handlungssystem. Organisiertes Handeln ist dabei wie in Abbildung 5.29 so zu verstehen, dass die Akteure (hier: A_1 bis A_n) für sich handeln, dabei aber vom System (in irgendeiner Weise) beeinflusst werden. Die Einflüsse des Systems stellen eine Vorbedingung für das ansonsten unabhängige Handeln der Akteure dar.

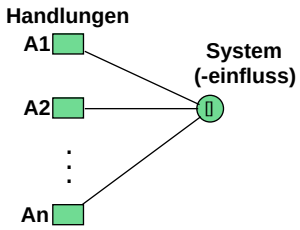


Abbildung 5.29: Systemgesteuertes Handeln

„Das System entwickelt sich durch die sozialen Akteure“, die Handlungen der Akteure haben also in Ergänzung zu Abbildung 5.29 einen Einfluss auf das System. Dieser ist in Abbildung 5.30 modelliert, die einen Ausschnitt der vorigen Abbildung darstellt. Es ist noch nicht zu erkennen, ob die Handlungsauswirkungen auch weitere Handlungen beeinflussen können, Einflüsse und Auswirkungen stehen getrennt nebeneinander.

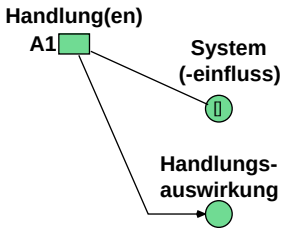


Abbildung 5.30: Handeln verändert das System

Im weiteren wird ausgeführt, dass Akteure *im* System, also mit Systemkomponenten handeln. Dabei werden folgende systemeigenen Komponenten besonders hervorgehoben: systemeigene Ressourcen, strukturelle Beschränkungen bzw. unstrukturierte Freiräume sowie strukturierte Rationalität. Diese Aufteilung spiegelt sich in Abbildung 5.31 wider. Die Handlungen eines Akteurs (hier: A_1) sind durch durch die System(-einflüsse) (konkretisiert durch die drei Plätze Ressourcen, struk. Freiräume und struk. Rationalität) modelliert.

Vom System beeinflusste (organisierte) Handlungen finden ausschließlich in Spielen statt, deren Regeln das System vorschreibt, während dem Akteur die

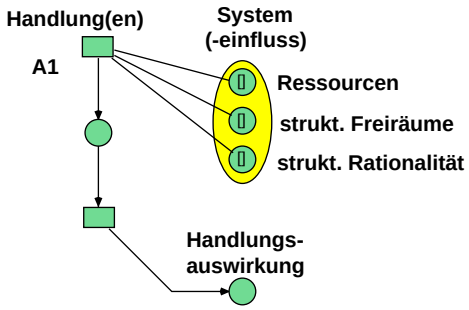


Abbildung 5.31: Systemeinflüsse

Freiheit der Strategiewahl bleibt. Handeln im System ist also zweistufig: an die lokale erste Stufe der Strategieauswahl schließt sich die zweite Stufe des gemeinsamen Spiels an.

Zur Verdeutlichung dieser Unterscheidung wurden in Abbildung 5.32 die Transitionen des (gemeinsamen) Spiels aller Akteure miteinander verschmolzen. Die lokale Strategieauswahl für den Akteur A_i führt zu der Strategie $\mathsf{Strategie}_i$, die im gemeinsamen Spiel wirksam wird.

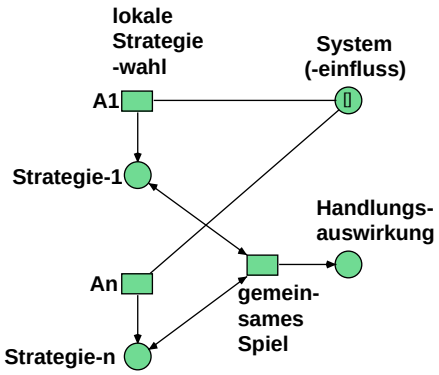


Abbildung 5.32: Gemeinsames Spiel

Vom Spiel gehen nun die Wirkungen auf das System aus. Es gibt noch immer keine Aussage darüber, ob und wie die vom Spiel auf das System induzierten Effekte auf weitere Handlungen (z.B. durch Anpassung der Strategiewahl) einwirken.

Die lokale Wahl der Spielstrategie unterliegt Nebenbedingungen, die diesmal im Akteur selbst beheimatet sind: seinen lokalen Ressourcen und Fähigkeiten. Dabei ist immer eine Kombination aus beidem vonnöten: Ressourcen zu besitzen allein genügt nicht, ein Akteur muss auch die Fähigkeit haben, diese einzusetzen. Der Besitz eines „Trumpfes“ muss dadurch ergänzt werden, die jeweilige Situation so umdefinieren zu können, dass der Trumpf auch „sticht“. Die Akteur-externen Nebenbedingungen (des Systems), die „Organisierung“ des

Handlungsfeldes kann zu Zwängen und vertraglichen Regelungen konkretisiert werden.

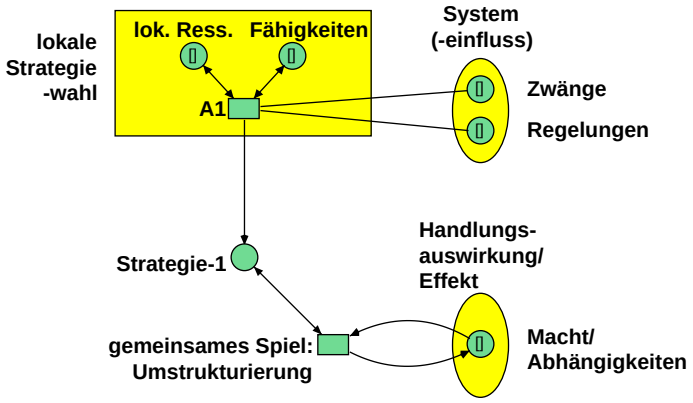


Abbildung 5.33: Spiel: Verfeinert

Spiele haben, wie schon zuvor festgestellt (vgl. Abbildung 5.30), einen (evtl. unintendierten oder kontraintuitiven) Effekt. Als ein möglicher Effekt wird die Umstrukturierung von Machtverhältnissen beziehungsweise Abhängigkeiten genannt. Daraus ergibt sich für jeden einzelnen Akteur die Lage in Abbildung 5.33. Die lokale Auswahl einer Strategie durch den Akteur geschieht dabei auch nur lokal rational, das heißt in Bezug auf die jeweilige Beschaffenheit des Spiels, an dem der Akteur beteiligt ist.

Die organisationalen Machtbeziehungen

Das Machtkonzept nimmt im Strategischen Ansatz eine hervorgehobene Position ein. Crozier/Friedberg vertreten ein relationales Machtkonzept, d.h. Macht ist allein in Akteursbeziehungen wirksam und ablesbar; nur in der Beziehung zwischen den Akteuren kann sie entstehen, sich reproduzieren oder verändern. Sie ist aber auch mit der spezifischen Persönlichkeit des Akteurs und seinen Eigenschaften verknüpft, nicht etwa mit der Position oder Rolle, die dieser innehat. Das heißt, dass nicht jeder Akteur gleichermaßen in der Lage ist, Macht in Handeln umzusetzen. Hierzu braucht es besonderes Geschick, Erfahrung und Fähigkeiten. Kann man in einer gegebenen Situation Macht über einen bestimmten Akteur ausüben, so kann das Machtverhältnis jäh ins Gegenteil umschlagen, wenn z.B. der „Gegenspieler“ wechselt oder andere hinzukommen. Grundsätzlich gibt es kein soziales Handeln ohne Macht.

In den Worten von Friedberg: „Macht ist kein Attribut und kann nicht besessen werden. Sie ist kein Gut, das man mit sich führen kann, um es irgendwo aufzubewahren oder wie Geld zu sparen“ (Friedberg, 1995, 112). Macht steckt in den „vorhandenen Strukturen des Handlungsbereiches oder vielmehr in der Asymmetrie der Ressourcen, die die Akteure daraus beziehen, um ihre Transaktionen durchzuführen ... Er [der Akteur] übt sie aus, indem er die stets asymmetrisch verteilten Ressourcen benützt, die die Strukturen eines Handlungskontextes ihm zur Verfügung stellen. Erst wenn man Macht ausübt, macht man sie wirklich

und wirksam, und nur dann setzt man die vorhandene Asymmetrie in soziales Handeln um“ (Friedberg, 1995, 112).

Das Machtkonzept dient Crozier/Friedberg ebenfalls als vermittelndes Denk- und Analysewerkzeug für die Handlungs- und die Struktur- bzw. Systemebene: Handlungen (die also immer eine Form der Ausübung oder des Akzeptierens von Machtverhältnissen sind) und die Strukturierung des Handlungsfeldes, in dem sie stattfinden, stehen in einer Wechselbeziehung zueinander. Jedes machtbezogene Handeln setzt die Strukturierung des Handlungsfeldes voraus, indem das strukturierte Handlungsfeld derartige Handlungen erst ermöglicht; und jedes Handeln schafft gleichzeitig die Strukturierung des Feldes, also eine Regelung und Beschränkung des Handelns der betreffenden Akteure (vgl. Friedberg, 1995, 111).

Crozier und Friedberg argumentieren, dass man mit einer Analyse von *formalen* Organisationsstrukturen nicht weit kommen würde, wenn man die vorherrschenden Machtverhältnisse erkennen möchte: „Zur Erklärung der Besonderheiten in der Funktionsweise einer konkreten Organisation genügt es jedoch keineswegs, auf die grundlegenden Struktureffekte und -abhängigkeiten hinzuweisen“ (Crozier und Friedberg, 1993, 49). Die Vielfalt der Handlungslogiken muss erklärt werden, indem Machtbeziehungen auf ein autonomes Handlungsfeld und die es kennzeichnenden Zwänge zurückgeführt werden. Diese Analyseform wird zur Aufdeckung einer zweiten Machtstruktur führen, die parallel zur offiziellen, im Organigramm festgelegten verläuft. Anomalien und Abweichungen können lokalisiert und verstanden werden, die zwischen der offiziellen Fassade und den realen Prozessen liegen (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 54-55).

In dieser Sichtweise lassen sich nach Crozier und Friedberg (1993, 50-54) vier Machtquellen identifizieren:

1. Die Beherrschung eines spezifischen Sachwissens und einer funktionalen Spezialisierung, die einzelnen Experten Vorteile und Privilegien verschaffen.

2. Akteure, die besondere Positionen innehaben, welche zwischen Organisation und Umwelt angesiedelt sind, verfügen häufig über ein überlegenes Spezialwissen und Kontrollfunktionen, z.B. gegenüber der Umwelt als einem potentiellen Störfaktor.

3. Kommunikation und Informationsflüsse verschaffen den Akteuren Macht bzw. beschränken die Macht der Akteure. Da der Akteur zur Erledigung seiner Aufgaben auf Informationen durch andere angewiesen ist, kann durch die Weitergabe (bzw. das Zurückhalten) von Informationen die Handlungsfähigkeit des Empfängers beeinflusst werden. Der Informationsfluss kann auch graduell variieren durch das Verzögern, Filtern, „Schminken“ und „Zurecht drehen“ von Informationen.

4. Organisatorische Regeln bilden die vierte Machtquelle. Prinzipiell sollen die Regeln Ungewissheitszonen minimieren, dies gelingt aber nicht vollständig, denn mit jeder neuen Regel werden auch neue Ungewissheitszonen geschaffen, z.B. dadurch dass sie nicht nur die Freiheit der Untergebenen,

sondern auch die des Vorgesetzten einschränkt, der dadurch keine Mittel mehr zur Hand hat, seine Untergebenen dazu zu bringen, etwas außerhalb dieser Regeln zu tun.

Mit der Bezugnahme auf die verschiedenartige Ressourcenausstattung der Akteure kommt zum Vorschein, dass in einer Machtbeziehung auch die Gewinnchancen unterschiedlich verteilt sind. Die Akteure sind – auch empirisch – über ihre soziale Lage zu fassen, die ihre „strategischen Fähigkeiten“ bedingt (vgl. Crozier und Friedberg, 1993, 45). Genauer bedeutet das für die empirische Analyse: „Bettet man solcherart die Akteure in ein strukturiertes soziales Feld ein und zeigt man, wie ihre strategischen Fähigkeiten durch ihre Stellung in diesem Feld umschrieben sind, dann kann man auch Begriffe wie ‚soziale Macht‘, ‚Stärke‘ oder ‚sozialer Einfluß‘ neu begreifen und einer empirischen Erfassung zugänglich machen: man kann sie verstehen als die größere Fähigkeit eines Spielers, das für eine Machtbeziehung relevante Handlungsfeld derart auszudehnen, daß das Kräfteverhältnis letztlich zu seinen Gunsten ausschlägt. Auf diese Weise ist man auch in der Lage, die sozialen Ungleichheiten zwischen Akteuren in die Analyse einzubeziehen ...“ (Crozier und Friedberg, 1993, 45-46).

Die Struktur der Machtbeziehungen verrät wiederum viel über die vorherrschenden Bedingungen, in die die Akteure ihre Strategien und Spiele einfügen müssen. Denn um Macht auszuüben, muss man in der Lage sein, die Zwänge und Gelegenheiten der gegebenen aktuellen Situation zu nutzen, um die für seine Zwecke günstigen Tauschbedingungen durchzusetzen (vgl. Friedberg, 1995, 116) – was voraussetzt, dass der Akteur die „Gelegenheit beim Schopfe packt“, über die erforderlichen Ressourcen verfügt, um die Situation zu seinen Gunsten zu wenden und diese Ressourcen und Fähigkeiten auch richtig einzusetzen vermag.

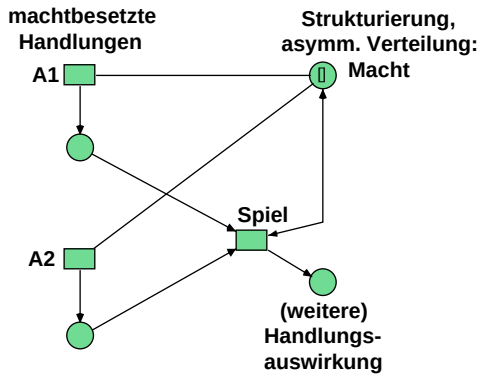


Abbildung 5.34: Machtbesetztes Handeln

Macht ist also ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Wahl einer Strategie. Macht ist in asymmetrisch verteilten Ressourcen „versteckt“, kann aber für die Modellierung explizit gemacht werden. In Abbildung 5.34 wird die übliche Folge aus Handlungsvoraussetzungen, Strategiewahl, Spiel und Handlungsauswirkungen erstmals zu einem Kreislauf ergänzt. Es zeigt sich, dass Crozier und Friedberg davon ausgehen, dass Handeln eine Wirkung auf Machtverhältnisse

besitzt. Der Abbildung liegt die folgende Aussage zu Grunde: „Machtbesetztes Handeln setzt die Strukturierung des Handlungsfeldes voraus [...] und schafft sie gleichzeitig, indem sie das Handeln der betreffenden Akteure regelt [...]." Die Strukturierung des Handlungsfeldes ist eine Voraussetzung für soziales Handeln (Abb. 5.34 rechts oben). Das im Spiel versteckte Handeln wiederum schafft Strukturen, die (weitere) Handlungen beeinflussen.

Mit diesem Modell kann die in den vorherigen Modellierungen offen gebliebene Lücke geschlossen werden. Handlungen werden von der Strukturierung des Handlungsfeldes beeinflusst und formen dieses wiederum. Speziellere Aussagen über andere Eigenschaften des Handlungsfeldes bleiben bei Crozier und Friedberg leider aus.

Möchte man sich dem Phänomen Macht in Organisationen nähern, so muss man sich in den bereits erwähnten *Ungewissheitszonen* auf die Suche begeben, die es in jeder Organisation gibt (vgl. hierzu die Ausführungen von Crozier und Friedberg, 1993, 43ff.). Ausgangspunkt dieser Festlegung ist die Grundannahme, dass keine völlig geregelten und kontrollierten sozialen Handlungsfelder existieren. Sogar die formalisierteste Organisation, die man sich vorstellen kann, lässt den Akteuren immer noch einen Freiraum, den diese strategisch nutzen können, was immer sie auch tun. So können noch so viele strukturelle Zwänge, Regeln, Verfahren und Zielvorgaben nie das gesamte Organisationsgeschehen erfassen und abdecken, sondern lassen immer noch Lücken, in denen sie nicht greifen. Aber nicht genug damit, dass die Ungewissheiten in Organisationen nie ganz verschwinden: Der Versuch, mit formalen Regeln „Probleme zu rationalisieren, Ungewißheiten und Zufälle im Verhalten und in den Abläufen zu beseitigen und das Funktionieren einer Organisation zu stabilisieren, zu regeln und damit vorhersehbarer zu machen" erzeugt sogar immer auch *neue Ungewissheiten* mit, die aus den Schwierigkeiten erwachsen, „die die tägliche Anwendung und Umsetzung ihrer Vorschriften bereiten, und die ihrerseits den Mitgliedern der Organisation Möglichkeiten zum ‚Spiel' mit den formalen Gegebenheiten einräumen" (Friedberg, 1995, 147).

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Grundlinien soziologischer Theoriebildung unter den drei zentralen Blickwinkel des Individualismus, der Intersubjektivität und des objektiven Ansatz betrachtet.

Für den Individualismus werden soziale Prozesse mit Hilfe von Akteursmodellen erklärt. Der Homo Sociologicus orientiert sein Handeln an Normen, wobei es zu Konflikten zwischen den Rollenerwartungen kommen kann, die in *role making*-Prozessen aufgelöst werden. Der Homo Oeconomicus verfolgt mit seiner Wahl eine Kosten/Nutzen-Optimierung (engl. rational choice), wobei auch eine egoistische Perspektive aufgrund von Interdependenzen zu sozialen Effekten führt. Der „Emotional Man" und der Identitätsbehaupter erweitern die handlungsleitenden Aspekte um die Kategorie der Gefühle bzw. um den Wunsch, als Individuum anerkannt zu werden. Aus der intersubjektiven Perspektive äußert sich Sozialität durch die Strukturdynamik zwischen den Akteuren. Wir haben

hier die Konstellationen wechselseitiger Beobachtung, Beeinflussung und Verhandlung betrachtet. Im Rahmen des objektiven Ansatzes haben wir spezielle vorstrukturierte Handlungsfelder betrachtet, nämlich Organisationen. Organisationstheorien behandeln insbesondere das Wechselspiel von formaler und informeller Organisation. Als konkretes Beispiel haben wir den strategischen Ansatz von Crozier/Friedberg modelliert, hier speziell wie sich das strategische Verhalten der Organisationsmitglieder in Spielen und Spielregeln ausdrückt und sich in organisationalen Machtbeziehungen niederschlägt.

Die hier vorgestellten Modelle wurden in der universitären Lehre verwendet, um soziologische Theoriezusammenhänge zu visualisieren. Es zeigte sich, dass die Modelle sich sehr gut eignen, damit Studenten sich die Theorieaussagen aneignen und darauf aufbauend die Stärken und Schwächen der Theorien diskutieren können.

6 Mikro/Makro-Wechselwirkungen

Unser Sozionikprojekt ASKO hatte es sich zur Aufgabe gemacht, Sozialtheorien für das Design von Multiagentensystemen fruchtbar zu machen. Dabei taten sich zwei zentrale Problemfelder auf: auf soziologischer Seite das Bedürfnis nach Theorieintegration und informatischer das nach Konstruktivität.

Wie bereits in Kapitel 5 dargestellt, lässt sich Soziales von einer Vielzahl von Perspektiven aus betrachten. Es gibt somit eine Vielzahl von Sozialtheorien, deren gegenseitige Vereinbarkeit und somit auch deren Integrationsfähigkeit zunächst offen ist. Alle diese Perspektiven, wie Gesellschafts-, Organisations- und Akteurstheorien, besitzen jeweils ihre Berechtigung, denn analytisch sind alle drei Perspektiven gleichberechtigt, und prinzipiell kann jede Sozialtheorie von jeder der drei Sichten her entwickelt werden. In der Darstellung ist dann ein Grundelement von primären Betrachtungsinteresse und die beiden anderen von sekundärem. Pauschal gesprochen denkt Gesellschaftstheorie Soziales primär von den Sozialstrukturen her, Akteurstheorie dagegen von den Akteuren. Es zeigt sich aber auch deutlich, dass die Betonung einer Perspektive dazu verleitet, die jeweils anderen zu vernachlässigen. Gerade die Verwendung einer ausgezeichneten Vorzugsperspektive birgt für die Theorieentwicklung die Gefahr der Inkonsistenz oder der Unvollständigkeit. Um solche Inkonsistenz oder Unvollständigkeiten zu verhindern, ist es für unsere Integrationsarbeit wichtig, das Augenmerk auf das Wechselspiel von sozialen Akteure, Prozesse sozialen Strukturen zu richten und ausgehend von diesen übergeordneten Theoriestrukturen unsere Sozialtheorie zu formulieren.

Das zweite Problemfeld der Konstruktivität von Theorien ist für unser Forschungsvorhaben von besonderer Wichtigkeit, da die Theorie nicht nur als Erklärungsmodell, sondern auch als Konstruktionsmetapher für Multiagentensysteme dienen soll. Für ein Erklärungsmodell ist der innere Aufbau irrelevant, insofern, als dass zwei Theorien, die jeweils konsistent mit den beobachteten Daten sind, nicht unterscheidbar sind. Es macht daher in Hinblick auf ihren Erklärungs- und Prognosecharakter keinen Sinn, die Frage zu stellen, welche der beiden Theorien besser oder richtiger sei. Betrachtet man die Theorien dagegen als Konstruktionsmetapher, so macht diese Frage wieder Sinn, denn man kann Theorien beispielsweise in Hinblick auf ihre Komplexität oder ihre Symmetrie vergleichen und sich für die einfachste entscheiden wollen.

Beiden Problemfelder – Integrationsbedürfnis und Konstruktivität – begegneten wir mit unserem Ansatz, der kritische Theorierekonstruktion und -integration der Soziologie mit Modellierung der Informatik verbindet. Im Forschungsprozess haben wir ein iteratives Vorgehen angewendet: Ergebnisse soziologischer Theorierekonstruktion wurden mit Hilfe von Petrinetzen modelliert. Der Modellierungsprozess stellte Anschlussfragen an die Theorie, brachte „blinde Flecken“ der Theorie zum Vorschein und deckte Querbezüge auf. Diese An-

schlussfragen koppelten zurück in die Theoriearbeit, die überarbeitete Fassung wurde erneut modelliert usw. Auf diese Art und Weise waren Theoriearbeit und Modellierung stets eng aneinander gekoppelt und evaluierten einander ständig.

Das soziologische Ziel des Forschungsprozesses war es, aus den verschiedenen, durch Organisations-, Akteurs- oder Gesellschaftstheorien eingenommen Perspektiven eine den Theorien unterliegende, gemeinsame Sozialtheorie zu rekonstruieren. Besonderer Stellenwert besitzt hierbei die Mikro/Makro-Problematik (Kapitel 6.2), so dass die Theorie nicht nur eine Beschreibung der Mikro- und der Makroelemente enthalten wird, sondern speziell das Wechselspiel der beiden in das Zentrum ihrer Betrachtung stellt (vgl. Kapitel 6.1). Hierzu betrachten wir im folgenden wechselseitige Abstimmung in etablierten Sozialtheorien. Bei Norbert Elias ist es die von Ängsten und Schamgefühlen angetriebene Normreproduktion, bei Pierre Bourdieu ist es der Symbolkampf im Feld, bei dem die Akteure danach trachten ihr symbolisches Kapital zu vergrößern (Kapitel 6.3) und bei Heinrich Popitz ist es die Ausbildung und Reproduktion von Verhaltensregelmäßigkeiten, der sich aus dem Wunsch der Akteure speist, ihre Umwelt zu ordnen und damit prognostizierbar und beherrschbar zu gestalten (Kapitel 6.4).

Die Informatik ist durch die Analyse der Modelle in der Lage, Gemeinsamkeiten bezüglich der beschriebenen Strukturen und Prozesse herauszuarbeiten. Diese Analyse mündet in ein integriertes *Mikro/Makro-Modell*, das wir in Kapitel 6.5 vorstellen. Da beide Analyseansätze auf der gleichen Theoriegrundlage operieren, lassen sich die integrierte Theorie und das Mikro/Makro-Modell wiederum in Beziehung setzen, so dass sich der wechselseitige Rückkopplungsprozess auf dieser Ebene erneut vollzieht. Wir betrachten diese Rückkopplung im ebenfalls im Abschnitt 6.5.

6.1 Dualität: Der Mikro/Makro-Bezug

Die Fragen, wie sich gesamtorganisationelles Verhalten durch die Akteure konstituiert und wie eine Organisation Einflüsse auf den Akteur erzeugt, beschäftigen sich mit den Übergängen zwischen der Makro- und der Mikroebene, d.h mit der Frage, wie und warum ein Akteur in der Organisationsstruktur handelt. Diese Übergänge spiegeln sich in den Theorien in der Darstellung von Kooperationsmechanismen, Handlungs- und Interaktionsmustern und des Mikro/Makro-Zusammenhangs, von Stabilität und Steuerung der Organisationen sowie von dynamischen Transformationsprozessen und emergenten Phänomenen wider.

Neben der akteurszentrierten – und damit den Multiagentensystemen nahestehenden – Sichtweise (Mikroperspektive) existiert in der Soziologie eine strukturbasierte Sichtweise, die zur Beschreibung sozialer Phänomene mit den Kategorien Normen, Werte, Rollen etc. heranziehen (Makroperspektive). Beide Perspektiven sind in dualistischer Art und Weise miteinander verbunden, insofern, als dass die Makroelemente die Aktionen der Mikroelemente einerseits ermöglichen oder einschränken, andererseits die Mikroelemente durch ihre Aktionen die Makroelemente erst erzeugen. Mikro- und Makroelemente stehen also in einem wechselseitigen Konstitutionsverhältnis. Als spezielles Beispiel der Sozialwissenschaft kann man die Akteure mit ihren Handlungen als Mikroelemente und das

gesellschaftliche Normensystem als Makroelement auffassen. Die Sozionik räumt dem Mikro/Makro-Dualismus besonderen Stellenwert ein, da er als Schlüssel zur Konstruktion skalierungsfähiger Multiagentensysteme gilt (vgl. Schillo u. a., 2000).

6.1.1 Der reduktionistische Ansatz

Für die Konzeption dieser Wechselseitigkeit von Mikro- und Makroelementen ist entscheidend, ob man einem dem beiden den Vorrang gibt. Wählt man eine Perspektive als die primäre aus, so muss die jeweils andere abgeleitet sein, d.h. das sich die sekundären Elemente auf die primären zurückführen lassen. Dieser Erklärungsansatz ist unter dem Stichwort *Reduktionismus* bekannt.

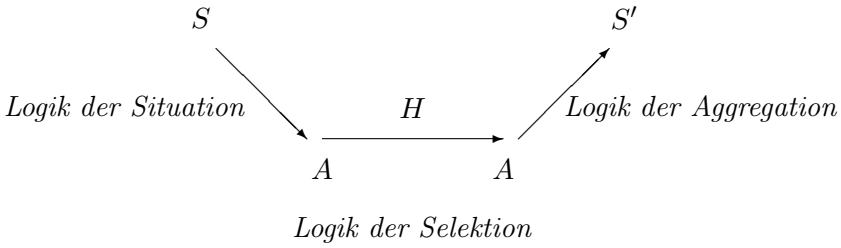


Abbildung 6.1: Die drei Logiken einer Sozialtheorie

Innerhalb der Soziologie ist es weit verbreitet, den Mikroelemente den Vorrang zu geben.[1] In diesem Fall sind die sozialen Strukturen aus dem handelnden Zusammenwirken der Akteure heraus zu klären.

> „Um zu erkennen, wie eine Theorie dies alles abdecken kann, sollte man noch einmal das dreiteilige Paradigma zur Erklärung von Phänomenen der Makroebene betrachten, das aus Beziehungen dreier Typen besteht: dem Übergang von der Makro- zur Mikroebene, zielgerichtete Handlungen von Individuen und dem Übergang von der Mikro- zur Makroebene.“ (Coleman, 1991, 24)

Diese Reduktion geschieht nach Esser in einer dreistufigen Art und Weise. Die soziale Struktur S rahmt die Handlungen des Akteurs A, der in dem Rahmen seine Handlung H auswählt. Der kumulierte Effekt individueller Handlungen resultiert in einer Transformation auf Strukturebene von S nach S' (vgl. Abb 6.1). Die Einbindung von Akteuren in die Struktur wird bei Esser durch die *Logik der Situation* beschrieben; die Handlungsauswahl des Akteurs durch die *Logik der Selektion*; die Auswirkungen der Handlungen auf die soziale Struktur als *Logik*

[1] Welche der beiden Perspektiven bevorzugt werden soll, ist aber nicht festgelegt, denn ähnlich wie bei vielen anderen Henne-und-Ei Problemen ist es Geschmacksfrage, ob und gegebenenfalls welchem Element man den Vorzug gibt. Zwar mag der Akteur empirisch oder auch ontologisch „realer“ als eine Norm sein, für eine theoretischen Modellbildung ist dies aber irrelevant. So besteht in der Kommunikationstheorie Luhmanns ein soziales System nicht aus Akteuren, sondern aus Kommunikationen.

der Aggregation. „Mit der Logik der Situation wird eine Verbindung zwischen der Makro-Ebene der jeweiligen speziellen sozialen Situation und der Mikro-Ebene der Akteure hergestellt. [...] In der Logik der Situation ist festgelegt, welche *Bedingungen* in der Situation gegeben sind und welche *Alternativen* die Akteure haben. Die Logik der Situation verknüpft die *Erwartungen* und die *Bewertungen* des Akteurs mit den Alternativen und den Bedingungen in der Situation." (Esser, 1993, 94) „Die Logik der Situation verbindet zwei Elemente der *Mikro*-Ebene: die Akteure und das soziale Handeln. Es ist die *Mikro-Mikro*-Verbindung zwischen den Eigenschaften der Akteure in der Situation und der Selektion einer *bestimmten* Alternative. Hierzu wird eine allgemeine Handlungstheorie benötigt, die es zulässt, die wichtigsten Merkmale der Situation aufzunehmen. Naheliegend ist daher eine Handlungstheorie, die in ihrem Ursachenteil die durch die Situation geprägten *Erwartungen* und *Bewertungen* der Akteure und in dem Folgeteil die verschiedenen, ihnen zur Wahl stehenden *Alternativen* enthält." (Esser, 1993, 95) „Mit der Logik der Aggregation wird die Mikro/Makro-Verbindung des Modells zurück auf die Ebenen der kollektiven Phänomene hergestellt. Erst über die Aggregation bzw. über die Transformation kommt es zur Verknüpfung zwischen den individuellen Handlungen und den kollektiven Folgen – den eigentlich interessierenden soziologischen Explanandum." (Esser, 1993, 97)

6.1.2 Der prozesstheoretische Ansatz

Eine Alternative zum Reduktionismus ist es, keines der beiden Perspektiven auszuzeichnen. Vielmehr ist das wechselseitige Konstitutionsverhältnis (Die sozialen Akteure reproduzieren durch ihre Handlungen die Bedingungen (Struktur), die ihr Handeln erst ermöglichen. Strukturen sind sowohl Medium als auch Ergebnis sozialen Handelns) in den Mittelpunkt der Theorie zu stellen. Entscheidend ist dann der Prozess, der Mikro- und Makroelemente miteinander verbindet. Mikro- und Makroperspektive werden nicht als zwei voneinander getrennte Perspektiven behandelt, sondern in ihrer wechselseitigen Beeinflussung studiert.

Betrachten wir als Beispiel einer solchen Prozesstheorie die Steuerung der Gruppenzugehörigkeit nach Elias, der die Reproduktion des Verhaltens von Mitgliedern einer Machtordnung als vielschichtigen Internalisierungsprozess von Zwängen beschreibt. Diese Prozesse basieren auf der Selbststeuerung und -regulierung der Individuen. Und diese Selbststeuerung wird durch eine innere Instanz gewährleistet, die Akteure ausbilden, um gemäß ihres fundamentalen Anerkennungsbedürfnisses ihr eigenes Verhalten und Empfinden zu beurteilen. Sie beobachten die wertende Haltung, die andere Akteure ihren Handlungen gegenüber einnehmen, und übernehmen deren Haltung, um sich selbst zu bewerten. Die Instanz nimmt also die vermutete Haltung anderer Akteure ein, und der Akteur beurteilt sich nun bald automatisch mit ihrer Hilfe. Die innere Urteilsinstanz, das Über-Ich, ist damit der Teil des Selbst, der das eigene Verhalten im Sinne des gesellschaftlichen Aufbaus regelt, umformt oder unterdrückt. Soziale Konflikte zwischen steuernd-kontrollierend-sanktionierenden und gesteuerten, kontrollierten, sanktionierten Akteuren werden damit aus dem Sozialen heraus abstrahiert (de-situiert) und in individuelle Psychen hinein verlagert, wo sie die Gestalt einer inneren Spannung zwischen Über-Ich (Gewissen,

Ehrgefühl) und Unbewusstem (*verdrängten Bedürfnissen, Trieben*) annehmen. Personen internalisieren soziale Konflikte bzw. die soziale Ordnung und tragen sie intrapersonal aus. Soziale Zwänge (Fremdzwänge) werden in personale Zwänge (Selbstzwänge) umgewandelt. Die einzelnen Personen werden dazu gebracht, nicht mehr ständig von außen, von anderen Personen gezwungen zu werden, sich funktional im Sinne gesellschaftlicher Erfordernisse zu verhalten, sondern sich selbst dazu zu zwingen.

Ähnlich argumentiert die Bourdieusche Theorie der Habitus-Feld-Dialektik, die gesellschaftliche Praxis als in Felder gegliedert vorstellt, wobei jedes Feld einen Habitus erzeugt, den die Personen inkorporieren, die in ihm geboren werden, und der die dem Feld eigenen Mechanismen reproduziert. Bourdieu begreift Gesellschaft als *Prozess sozialer Auseinandersetzungen* um symbolisches und ökonomisches Kapital. Entsprechend ist die aktuelle Gesellschaftsstruktur – das ist die gegenwärtige Verteilung von Kapital und damit von Ansehen, Macht und Lebensstilen – Resultat und Bilanz symbolischer Auseinandersetzungen. Gesellschaftsstruktur ist gewissermaßen der aktuelle Spielstand in den sozialen Auseinandersetzungen, eine Momentaufnahme der Kräfteverhältnisse zwischen sozialen Akteuren. Die Struktur der Kapitalverteilung befindet sich ständig in Bewegung, ihre Gleichgewichtszustände, so stabil sie auch erscheinen mögen, sind vorläufig.

Auch der strategische Ansatz der Organisationsanalyse strebt eine Verknüpfung verschiedener Perspektiven (der strategischen und der systemischen) explizit an. Crozier/Friedberg betonen immer wieder die zahlreichen Verflechtungen, die es zu berücksichtigen gilt: Sie sprechen von Wechselwirkungen zwischen dem handelnden Akteur und dem organisationalen System, davon dass sie sich gegenseitig bedingen und voraussetzen, dass es das eine nicht ohne das andere geben würde. Diese einleuchtende Sichtweise wird jedoch nicht unterfüttert und verliert an Schlagkraft, wenn man der Frage nachgeht, worin genau der Zusammenhang besteht und wie er sich konkret ausdrückt. Mit dem Spielkonzept wollen Crozier/Friedberg das Integrations- und Kopplungsproblem von Akteur und System lösen. Nachvollziehbar ist, wie und warum die Akteure ihre Strategiewahl treffen, wodurch diese bedingt wird und wie kollektive Strategien in Spielen zusammentreffen. Unklar bleibt jedoch die Verbindung vom Spiel zum System, wie nämlich sich die Spielweisen konkret auf das System auswirken und es verändern.

6.1.3 Gesellschaft als subjektive und als objektive Realität

Der Übergang zwischen der Mikro- und der Makroebene ist nur über das *Verhalten* innerhalb der Wechselwirkungsebene zu erklären. Dieses Verhalten bildet eine zusätzliche Qualität im System, nämlich die *Mesoebene* des Systems:

> „Die sozialen Gebilde stellen ‚unterhalb' der sie umschließenden Ebene eines umfassendes Kontextes eine *eigene* Ebene der Existenz und ihres Verhaltens dar. Und sie selbst bilden für die sie tragenden Akteure die Ebene ‚oberhalb' von deren Handeln. Die Existenz und das ‚Verhalten' der sozialen Gebilde stellen damit eine besondere Zwischenebene dar: Es gibt die *Meso*-Ebene der soziologischen

> Analyse zwischen den übergreifenden *Makro*-Strukturen der Gesellschaft und der *Mikro*-Aktionen der individuellen Akteure.“ (Esser, 1993, 112)

Eine wichtige Frage an dieser Stelle ist die Frage, wie man die *Existenz* der Modellelemente aufasst, genauer: ob man sie als subjektiv oder als objektiv real ansieht. Ein Element ist dann subjektiv real, wenn es als subjektives Konstrukt vorhanden ist. Es ist aber dazu nicht notwendiger Weise auch objektiv, d.h. losgelöst von den Subjekten existent. Als Beispiel betrachten wir den Stellenwert von Sozialstrukturen, speziell von Normen. Eine Akteurstheorie kann Normen als Elemente der Handlungsstrukturen, also als Teil des Akteursmodells konzipieren. Normen sind dann subjektiv existent. Sie sind es aber nicht objektiv, denn die Existenz des Konzepts ist an die des Akteurs gekoppelt. Das Normkonzept ist dabei im Verhältnis zum Akteur nachrangig. Eine im Gegensatz dazu objektiv konzipierter Normbegriff koppelt die Existenz der Norm nicht direkt an Akteure, so dass Normen auch *an sich* existieren können.

Aus der Perspektive des Beobachters sind beide Betrachtungsweisen nicht zu unterscheiden, da er sie in beiden Fällen rekonstruieren muss. Der zentrale Unterschied besteht aber darin, wie sich neue Strukturen ausbilden können. Sind die Strukturen nur subjektiv existent, so sind Normen nur als Korellation der Subjekte erkennbar. Sie sind Teil des Akteursmodells, werden aber nicht selbst existent. Sind sie dagegen objektiv konzipiert, so entstehen sie als Teil des Systems.

Wie bereits erwähnt, ist es jedoch für das Design eines Multiagentensystem unerläßlich, an dieser Stelle Position zu beziehen, da es hierbei gerade auf die Interna ankommt. Die folgenden Abschnitte werden uns Abhaltspunkte dafür liefern, die für die objektivierte Form der Modellierung sprechen werden.

6.2 Norbert Elias: Kontrolle und Internalisierung und Kernkonzepte[2]

Der folgende Abschnitt liefert die Ergebnisse einer Reanalyse von solchen Aspekten der Theorie von Norbert Elias, die sich mit Stabilisierungs- und Destabilisierungsprozessen sozialer Machtordnungen befassen. Analysiert wurden folgende Kerntexte der Eliasschen Soziologie: „Die Gesellschaft der Individuen“ (Elias, 1987) und die theoretischen Abschnitte aus „Der Prozess der Zivilisation“ (Elias, 1976) und „Etablierte und Außenseiter“ (Elias und Scotson, 1990).

Im Laufe der Modellierung entstanden mehrere Modellfragmente (siehe auch v. Lüde u. a., 2003). Die Teilmodelle bestehen aus sieben elementaren Aktivitäten (modelliert als Transitionen: kontrollieren, internalisieren, erwartungskonform handeln, anerkennen, dämpfen von Angst, reproduzieren von Schamgefühl und bekräftigen von Normen) sowie neun elementaren Objekten (modelliert als Bedingungen: Normen, Fremdzwänge, Selbstzwänge, Normbefolgung, Achtung,

[2] Dieser Abschnitt basiert auf der gemeinsamen Arbeit mit meinem Kollegen Roman Langer und stellt eine Überarbeitung von (Köhler u. a., 2003c) dar. Das Textmanuskript stammt dabei von Roman Langer, auf dessen Basis von Michael Köhler die Modelle entwickelt wurden.

Furcht, Peinlichkeitsempfinden, Scham und zur Geltung gebrachte Norm). Die verschiedenen Aktivitäten setzen sich innerhalb eines sozialen Prozesses zusammen. Ein Beispiel für einen solchen Prozess ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Man erkennt hier sehr schön, welche Aktivitäten kausal von einander abhängen.

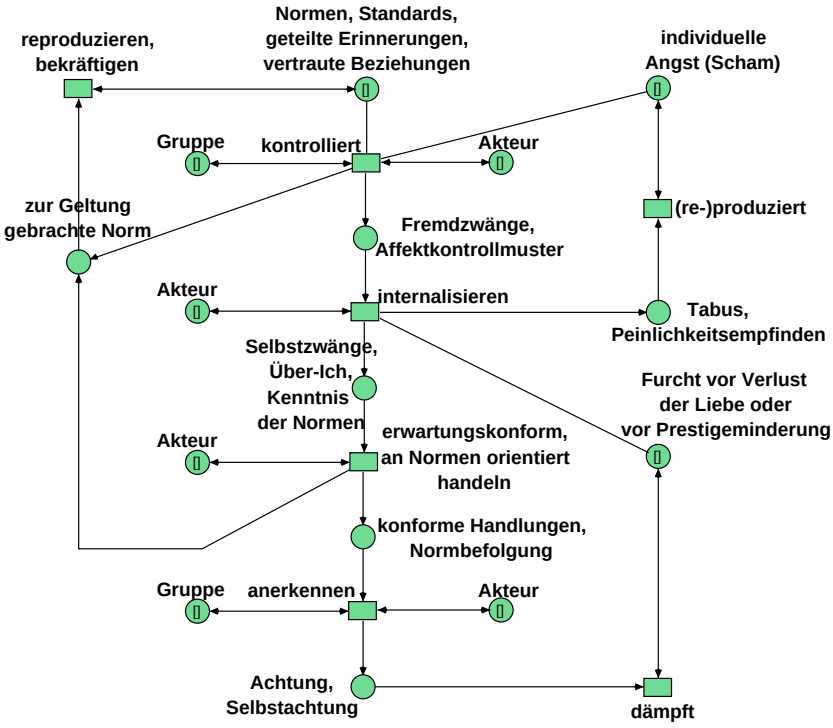


Abbildung 6.2: Steuerung der Gruppenzugehörigkeit nach Elias

Es zeigte sich, dass die verschiedenen Modellfragmente miteinander konsistent und daher kombinierbar sind. Die Kombination der Modellfragmente zu einem Gesamtmodell ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Analysiert man die Modellstruktur, so erkennt man vier Reproduktionskreisläufe, die in der Abbildung durch Kreise im Netzgraphen erkenntlich sind. Der erste Kreislauf stellt die Reproduktion von Normen durch die Kontrolle dar, der zweite die Reproduktion von Scham durch die Internalisierung der Akteure, der dritte die Reproduktion der Norm durch erwartungskonformes Handeln der Akteure und der vierte die Reproduktion von Furcht vor Achtungsverlust. Diese Formen der Rückkopplung sind interessanterweise alle bereits in der Theorie (bzw. in der Prozessdarstellung aus Abbildung 6.3) angelegt, ohne dass sie in der Theorie ausdrücklich als solche gekennzeichnet wären. Die strukturelle Darstellung des Modells in Abbildung 6.2 lässt sie jedoch unmittelbar deutlich werden – ein unmittelbar einleuchtender Vorteil.

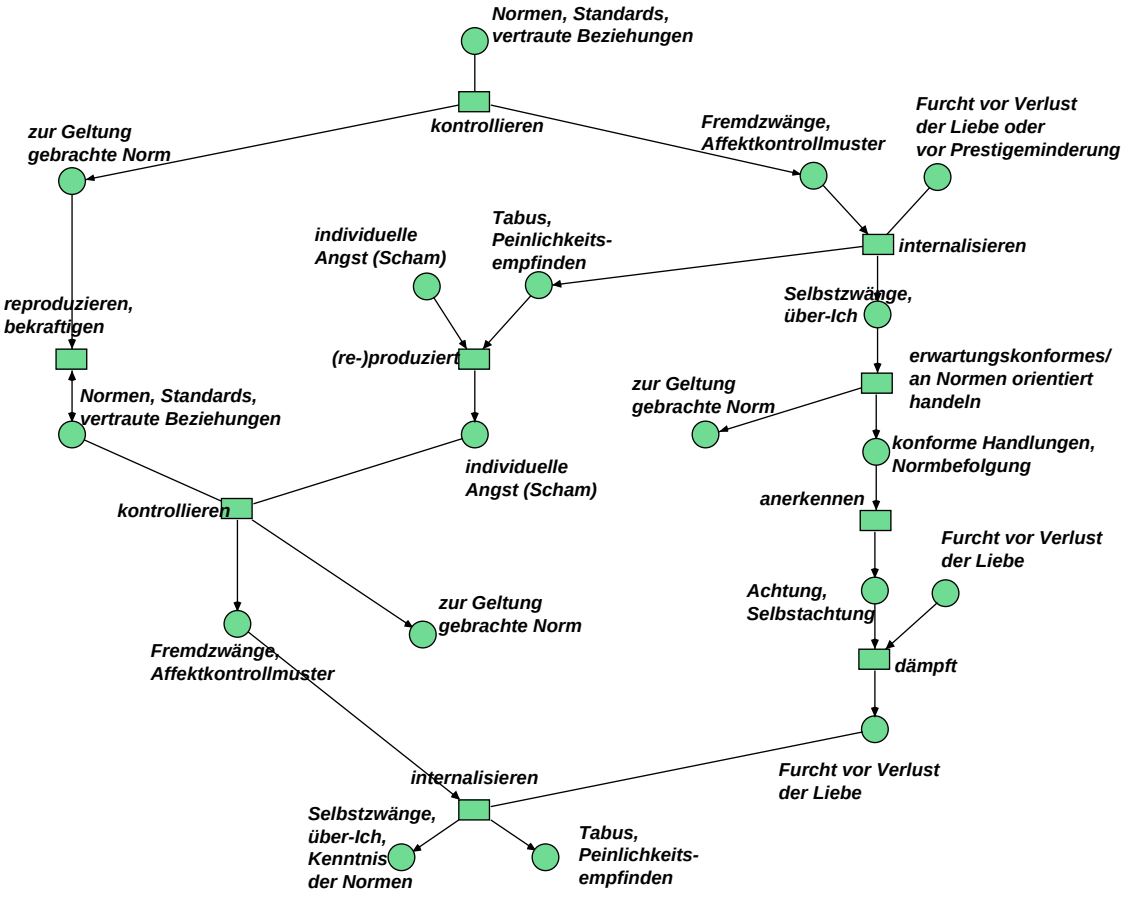


Abbildung 6.3: Prozess

6.2.1 Der Monopolmechanismus

Gesellschaftliche Konkurrenz zwischen „verteilten Monopolen“ erzeugt Zentralisierung und Monopolisierung gesellschaftlicher Macht. Der Monopolist wird Sieger in der sozialen Konkurrenz.

Konkurrenz erzeugt Zentralisierung Konkurrenz muss nach Elias als Movens gesellschaftlicher Entwicklung gelten.[3] Gesellschaftliche Konkurrenz zwischen „verteilten Monopolen“ erzeugt zunehmende Teilung bzw. Differenzierung gesellschaftlicher Funktionen. Mit der Funktionsteilung entstehen Gruppen (Akteure), die diese Funktionen erfüllen und die Verfügung über diese Funktionen monopolisieren, d.h. in ihrem Interesse benutzen. Resultat sind Machtmonopole an physischer Gewaltausübung, an Produktions- und Konsumtionsmitteln (s. Abb. 6.4).

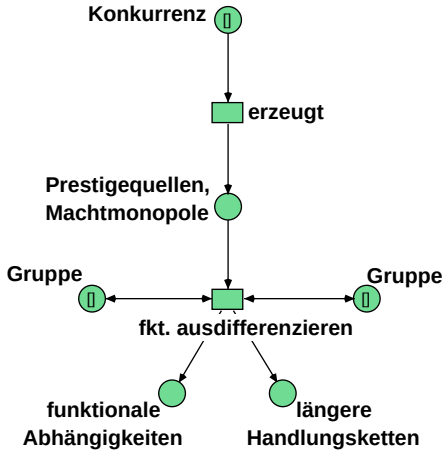


Abbildung 6.4: Die Erzeugung von Machtmonopolen und funktionellen Abhängigkeiten

Personen und Gruppen üben ihre eigenen Funktionen monopolistisch aus, und sie sind zunehmend darauf angewiesen, dass auch die jeweils anderen deren Funktionen ebenfalls wahrnehmen. Die gegenseitige Abhängigkeit der Akteure steigert sich.[4]

Das Verhältnis zwischen Monopolfunktionen und den Gruppen, die sie ausüben, ist gekennzeichnet durch Spannungen und Disproportionalitäten, mithin auch Funktionsstörungen. Diese Spannungen können so lange nicht aufgelöst werden, wie „verteilte“ Monopole bestehen und kein Zentralmonopol entwickelt ist. Die rivalisierenden Funktionsgruppen treiben sich unter solchen

[3] Elias liefert keine Erklärung, woraus diese Konkurrenz ihrerseits entsteht oder was ihr Antrieb ist, denn er hält sie für zwanghaft-mechanisch und irregulierbar.

[4] Funktionale Differenzierung („fortschreitende Funktionsteilung und Ausweitung der Interdependenzketten“) ist nach Elias die allgemeinste gesellschaftliche Transformation.

Umständen gegenseitig zur Ausdehnung und Verstärkung ihrer Machtpositionen (vgl. Abb. 6.5).[5]

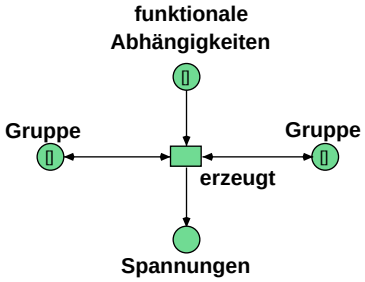


Abbildung 6.5: Abhängigkeiten erzeugen Spannungen

Der Gegenstand der sozialen Konkurrenz sind Prestigequellen, also Dinge oder Eigenschaften, die Ansehen, Gunst beim Machtzentrum und sozialen Erfolg verleihen. Prestigequellen sind zugleich Monopolchancen. Sie sind vererbbar und werden auch tatsächlich vererbt. Verschiedene Gruppen haben unterschiedliche Prestigequellen.[6]

Der Sieger dieser Konkurrenz- bzw. Ausscheidungskämpfe bildet das monopolistische Integrationszentrum einer größeren Herrschaftsorganisation. Seine Prestigequellen werden verallgemeinert; bspw. wird das Ethos der siegreichen Gruppe, das zunächst nur ihre Waffe im Kampf der Gruppen war, zum umfassenderen Ethos aller besiegten und nun funktional integrierten Gruppen. Die Prestigequellen der Verlierer werden in die Privatsphäre verschoben und darin verschlossen.

So erzeugen Konkurrenzkämpfe (a) Zentralisierung von Herrschaft und (b) funktionale Spezifikation unterworfener Personen(gruppen) – vgl. dazu Abb. 6.6.

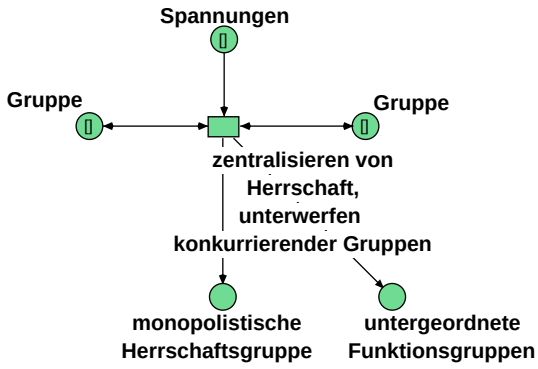


Abbildung 6.6: Monopolbildung

[5] Eine Gruppe, die in der Konkurrenz „nicht mitspielt“, wird sofort von anderen Gruppen abhängig.

[6] Und verschiedene Gesellschaften auch: In der höfischen Gesellschaft sind Prestigequellen etwa die Kunst (Ausgeschliffenheit) und Verfeinerung des geselligen Verhaltens; in der bürgerlichen Gesellschaft Beruf(liche Tüchtigkeit) und (Besitz von) Geld.

Sozialstruktur bestimmt emotionale Lage Generell bestimmt der Aufbau bzw. die Struktur der Gesellschaft die Stärke, Art, Gestalt und Struktur individueller Ängste, sowie ihre Rolle im persönlichen Seelenhaushalt. Die Veränderung der gesellschaftlichen Organisationsform, besonders der Gewaltorganisation, ist entsprechend der Motor der Veränderung des Verhaltens und der psychischen Selbststeuerung. Die Art des gewohnten Denkens, Verstehens und Fühlens eines Akteurs ist gesellschaftlich modelliert und damit abhängig von der gesellschaftlichen Lage, Stellung und Funktion des Akteurs und seiner „Modelleure".

Funktionalisierung erzeugt zivilisierten Habitus Je fortgeschrittener die Funktionsteilung bzw. funktionale Differenzierung ist, desto mehr Aktionen von immer mehr Personen müssen straff durchorganisiert und beständig aufeinander abgestimmt werden, damit sie ihre gesellschaftlichen Funktionen erfüllen können. Jeder Akteur ist in weitreichende Handlungsketten verflochten und wird, wie bereits angedeutet, in seinem Handeln von immer mehr Handlungen anderer Menschen abhängig. Um diese funktionale Abhängigkeit zu berücksichtigen und das Erfüllen seiner Funktion zu gewährleisten, um damit nicht gegen gesellschaftskonformes (funktionales) Verhalten zu verstoßen, muss ein Akteur seine Handlungen zwangsweise auf eine wachsende Anzahl anderer Handlungen abstimmen.

Das „erfordert beständige Rück- und Voraussicht auf die Aktionen und Absichten anderer über viele [Handlungs-]Glieder hinweg". Zugleich erfordert es, das eigene Verhalten und die eigenen Gefühle (Affekte, Triebe) selbst zu regeln, sich selbsttätig zu disziplinieren („an sich zu halten") und diese Selbstbeherrschung kontinuierlich zu steigern. Neigungen und Verhaltensweisen, die spontane, kurzfristige Befriedigung versprechen (Affekte, Neigungen, nahe liegende Wünsche, Triebe) werden gedämpft: „Die augenblickliche Lust oder Neigung wird in Voraussicht der Unlust, die kommen wird, wenn man ihr nachgibt, zurückgehalten" (Elias, 1976, 372), und zwar „aus der Einsicht in langfristigere und fernerliegende Verflechtungen" (Elias, 1976, 340) den Erfordernissen und Notwendigkeiten der sich verlängernden Interdependenzketten untergeordnet. Die Rücksicht auf ferner liegende Zwecke und Befriedigungen, auf etwas, das nicht in der unmittelbaren Gegenwart des Hier und Jetzt greifbar scheint, wächst.

Das Resultat ist Überlegung und Berechnung des Handelns auf längere Sicht („beständige Langsicht"). Der einzelne Akteur bedenkt weit zurückliegende Ursachen und mögliche, in ferner Zukunft liegende Wirkungen und Folgen – er berücksichtigt „immer längere Handlungsketten". *Unberechenbare* Schwankungen des Verhaltens werden durch die differenzierte, stabile und gleichmäßige Regulierung des eigenen Handelns ausgeschaltet.

So werden unter Bedingungen funktionaler Differenzierung „An-sich-Halten" und „Langsicht" ausgebildet: strenge und genaue Selbstregelung der Gefühle und Handlungen in Rücksicht auf die Handlungsketten, in die der Akteur verwoben ist. Die starke und umfassende Rück- und Voraussicht, die Affektbewältigung

und die Differenziertheit und Beständigkeit der Selbstzwänge kennzeichnen den psychischen Habitus des Menschen.[7]

Der moderne Mensch ist nicht mehr Gefangener seiner Leidenschaften, aber Gefangener der Funktionserfordernisse. Unmittelbare Bedürfnisbefriedigung und Wunscherfüllung gibt es zunehmend seltener, das Leben wird ungefährlicher, langweiliger und lustloser. Direkte Trieberfüllung ist ihm unmöglich; einige Bedürfnisse sind taub und unansprechbar geworden. Er fühlt sich unruhig, unbefriedigt und einsam. Deshalb braucht er Ersatzbefriedigung: Bücher, Filme, Träume. Das schafft aber nicht wirklich Abhilfe: Er kann den großen Leidenschaften nur zusehen und zuhören.[8] Eine negative Lustbilanz für die einzelne Person resultiert aus ungelösten inneren Widersprüchen und ist völlig üblich.

Internalisierung sozialer Ordnung: Fremdzwänge werden zu Selbstzwängen
Elias veranschlagt als elementare Bedingung der menschlichen Existenz ein Bedürfnis nach Geben und Nehmen in emotionalen Beziehungen, nach Sicherheit und Beständigkeit einer spontanen und emotional warmen Bejahung der eigenen Person. Dies Bedürfnis äußert sich (a) allgemein als Gefühlsverlangen nach menschlicher Gesellschaft, (b) konkreter nach Freundschaft und nach Zusammensein mit Menschen, die man gern hat, und (c) verdichtet als Bedürfnis, zu lieben und geliebt zu werden.[9]

Die Rückseite dieses Bedürfnisses ist die Angst vor dem Verlust an Achtung und Liebe: Jeder Akteur fürchtet den Verlust der Liebe oder Achtung von Anderen, an deren Liebe und Achtung ihm liegt oder gelegen war. Die wichtigsten und schwersten Ängste, die Personen haben können, beziehen sich auf den Verlust von Achtung und deshalb auf Verstöße gegen das, was die „Haltung der anderen“ erwartet (vgl. Abb. 6.8). Und darüber wird die fundamentale Tatsache, dass Menschen den Verlust von Liebe, Achtung, Anerkennung und Prestige fürchten (vgl. die folgenden Abbildungen 6.13, 6.12 und 6.9), für Prozesse der Gruppenbildung und Verhaltenssteuerung relevant.

Diese Prozesse basieren auf der Selbststeuerung und -regulierung der Individuen. Und diese Selbststeuerung wird durch eine innere Instanz gewährleistet, die Akteure ausbilden, um gemäß ihres fundamentalen Anerkennungsbedürfnisses bzw. ihrer Achtungsverlustangst ihr eigenes Verhalten und Empfinden zu beurteilen. Sie beobachten die wertende Haltung, die andere Akteure ihren Handlungen gegenüber einnehmen, und übernehmen deren Haltung, um sich selbst zu bewerten. Die Instanz nimmt also die vermutete Haltung anderer Akteure ein, und der Akteur beurteilt sich nun bald automatisch mit ihrer Hilfe. Die innere Urteilsinstanz, das Über-Ich, ist damit der Teil des Selbst, der das eigene Verhalten im Sinne des gesellschaftlichen Aufbaus regelt, umformt oder unterdrückt. Soziale Konflikte zwischen steuernd-kontrollierend-sanktionierenden und gesteuerten, kontrollierten, sanktionerten Akteuren werden damit aus dem

[7] Der Zivilisationsprozess ist eine Veränderung des Habitus. Er impliziert vor allem Richtung, Gestalt und Aufbau menschlicher Gefühle und Affekte (nicht nur der Rationalität allein).
[8] Es gibt auch unkontrollierbare Zu- und Abneigungen, Zwangshandlungen und Störungen, kuriose Steckenpferde.
[9] Moderne Menschen können diesem ihrem eigenen Verlangen nicht genüge tun: sie können spontane Gefühlswärme nicht gut geben und nicht gut empfangen.

Sozialen heraus abstrahiert (de-situiert) und in individuelle Psychen hinein verlagert, wo sie die Gestalt einer inneren Spannung zwischen Über-Ich (Gewissen, Ehrgefühl) und Unbewusstem (*verdrängten Bedürfnissen / Trieben*) annehmen (vgl. Abb. 6.7). Personen internalisieren soziale Konflikte bzw. die soziale Ordnung und tragen sie intrapersonal aus; dadurch wird sozialen Konflikten und Spannungen zugleich die Sprengkraft genommen.

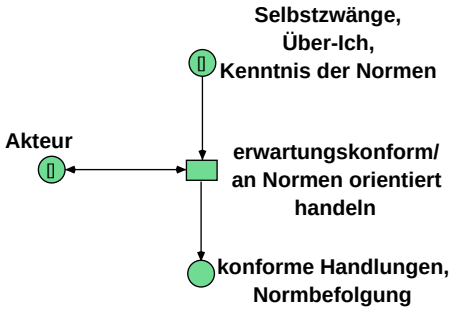


Abbildung 6.7: Konformes Handeln

Dies geschieht immer, wenn das öffentliche Austragen sozialer Widersprüche und Konflikte im Zuge der Einrichtung eines Gewaltmonopols verboten wird, also im Falle des Sieges einer Gruppe in einer Machtkonkurrenz. Im Zuge von Herrschaftsmonopolisierung und funktionaler Differenzierung werden also Ängste vor der Übertretung gesellschaftlicher Verbote umgeformt: sie nehmen die Gestalt individueller Scham- und Peinlichkeitsempfindungen an.[10]

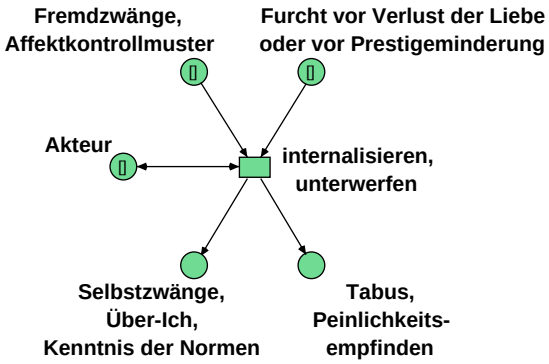


Abbildung 6.8: Internalisieren

Verstößt ein Akteur gegen die Haltung der „anderen“, erzeugt das in ihm Scham – das ist die Furcht vor sozialer Degradierung bzw. vor Überlegenheitsgesten anderer –, verstoßen andere dagegen, erzeugt das Verhalten Peinlichkeit (vgl. Abb. 6.8 und 6.12). Ein Peinlichkeitsgefühl ist eine Unlusterregung oder Angst, die entsteht, wenn ein Verhalten von jemand anderem die durch das

[10] Zugleich werden immer mehr und differenziertere Formen menschlichen Verhaltens mit Schamgefühl belegt.

eigene Über-Ich repräsentierte Verbotsskala durchbricht oder zu durchbrechen droht.

Scham- und Peinlichkeitsempfindungen also sind verantwortlich dafür, dass Personen ihr Verhalten (etwa: Manieren, Sprechweise) und Empfinden in Grenzen halten und an gesellschaftliche Standards binden.

Zusammengefasst: soziale Zwänge – Fremdzwänge – werden in personale Zwänge – Selbstzwänge – umgewandelt (vgl. Abb. 6.8).[11] Die einzelnen Personen werden dazu gebracht, nicht mehr ständig von außen, von anderen Personen gezwungen zu werden, sich funktional im Sinne gesellschaftlicher Erfordernisse zu verhalten, sondern sich selbst dazu zu zwingen.[12]

Selbstzwänge bestehen aus einem „Zaun von schweren Ängsten“ und sind stärker als der bewusste Wille der Akteure – sie sind eben Zwänge, weil die Akteure von Ängsten zum konformen Verhalten gezwungen werden. Sie wirken als eine „automatisch und blind arbeitende Selbstkontrollapparatur“, als sich selbst reproduzierende, automatische Gewohnheiten (die allerdings auch Verstöße gegen Normen und Verbote hervorbringen kann).

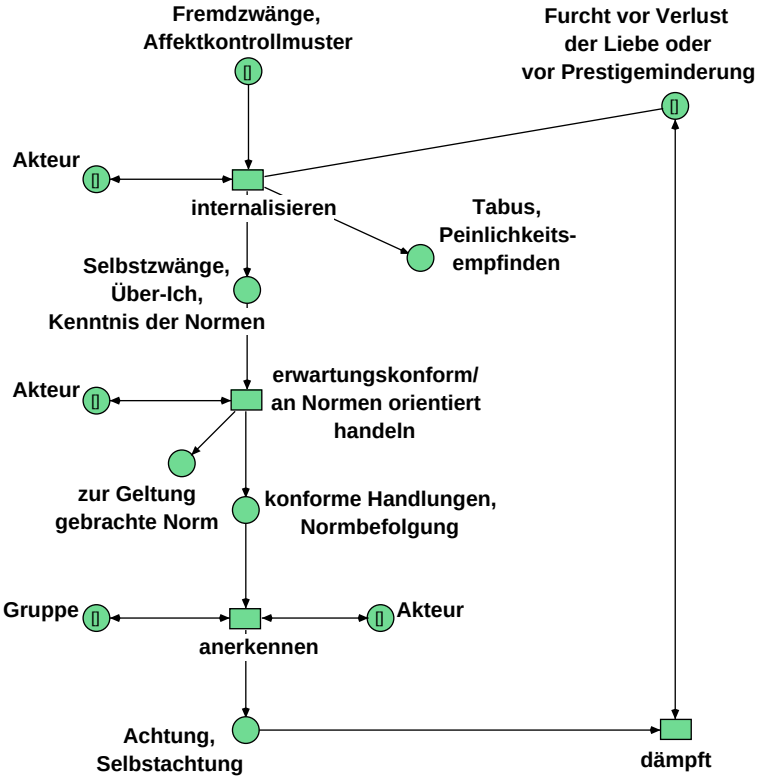


Abbildung 6.9: Reproduktionskreislauf: Internalisierung von Fremdzwängen

[11] Darin besteht die Zivilisierung des Verhaltens und Empfindens.

[12] Eine Bedingung der Selbstbeherrschung: Wer unmittelbar körperlich bedroht wird (Qual, Hunger, Krieg, Elend), kann Fremdzwänge nicht in Selbstzwänge umwandeln. Dafür bedarf es eines relativ gehobenen Lebensstandards und körperlicher Sicherheit vor physischer Überwältigung / Vernichtung. Beides wird durch steigende funktionale Differenzierung und Monopolisierung der Gewaltausübung gewährleistet.

Diese tiefgehende Prägung ist möglich, weil Menschen in hohem Maße modellierbar sind.[13] Die automatische Selbst-Regulierung (vgl. Abb. 6.9) wird den Akteuren „von klein auf“ anerzogen.[14] Eltern übertragen ihre Ängste auf (projizieren ihre Ängste in) die Kinder – eher durch Gesten und Haltung als über Worte; jedenfalls in erster Linie in Form von Verboten.[15]

Kriterien emotionaler Wertung bleiben unbewusst Die vermittelten Ängste sind den Eltern nur zur einem kleinen Teil bewusst. Der Löwenanteil der Erziehung zum funktionalen Verhalten hat den Charakter einer „latenten Funktion“, es sind Folgen unabsichtlichen elterlichen Erziehungsverhaltens. Die Ängste vor sozialem Abstieg (vor Prestigeverlust) bleiben den Akteuren generell unbewusst. So können und wollen die Akteure nicht begründen, was „peinliche“ von „angenehmen“ Verhaltensweisen unterscheidet und können/wollen nicht direkt benennen, welches die Ordnungskriterien der inneren Rangordnung der Gruppe sind. Dennoch kennen sie diese Unterscheidungen genau: sie wenden sie in der Praxis von Fall zu Fall schlafwandlerisch sicher an.

Nur an Selbststeuerungsautomatismen (wie in Abb. 6.13, 6.12 und 6.9 bzw. in deren Zusammenfassung in Abb. 6.2 dargestellt) werden die gesellschaftlichen Ängste erkennbar: (a) an verbreiteten Kommunikationshaltungen, symbolischen Wendungen, Stimmtonfall, (b) an affektgeladenen Abwehrgesten, mit denen etwa das Vulgäre, Bürgerliche, die Unterschichtgebärden streng aus dem eigenen Lebensraum ferngehalten werden, (c) an besonderen Empfindlichkeiten gegenüber der geringeren Sensibilität niederrangiger Schichten.

Der Nachhink-Effekt des Habitus Die Gesellschaftsstruktur wird also durch den Druck öffentlicher Gruppenmeinung und erzieherischer Maßnahmen in den sozialen Habitus der Personen überführt und lebt dort fort.[16]

Habitus bezeichnet im Eliasschen Sinn eine Persönlichkeitsstruktur mit Gewissen und Gefühlen, mit traditionellen Verwendungsmustern von Mutter- und Berufssprache etc.

Der Habitus ist hart und widerstandsfähig, aber elastisch und wandelbar. Er lebt um so fester und länger fort, je länger und kontinuierlicher er über immer mehr Generationen in seinen Grundzügen weitervermittelt wurde. So kann er sogar Bestand behalten, wenn sich die Gesellschaftsstruktur geändert hat. Er zeigt dann auch nachdrückliche Widerstandskraft gegen die durch Nachdenken

[13] „Der Mensch ist ein außerordentlich modellierbares und variables Wesen; die Veränderungen der menschlichen Haltung, von denen hier die Rede war, sind Beispiele für diese Modellierbarkeit; sie bezieht sich durchaus [auch auf die] ... ‚Physis' des Einzelnen.“ (Elias, 1976, 378)

[14] Dies gilt für das Wissen ebenso wie für die Ängste. „Jeder Erwachsene [muss] als Kind Wissen von anderen Menschen durch einen langen Lernprozess erwerben, ehe er oder sie erlerntes Wissen individuell weiterzubilden vermag.“ (Elias, 1987, 268)

[15] Ein als gelungen geltender Einpassungsprozess in eine bestehende Sozialität besteht laut Elias (a) aus gut ein- und angepassten, adäquaten Verhaltensweisen und (b) einer subjektiv positiven Lustbilanz. Meistens gelingt die Einpassung in Mischformen, selten vollständig und selten gar nicht.

[16] Es ist möglich, dass Personen, etwa Einwandererkinder, zwei soziale Habitus' anerzogen bekommen. Sie müssen die entstehenden Konflikte innerlich austragen.

gewonnene Einsicht in die stärkere Realitätskongruenz neuer, übergreifender Ordnungen. Diesen Widerstand nennt Elias den „Nachhink-Effekt“ des Habitus. (Im folgenden in Klammern versuchsweise am Beispiel eines universitären Fachbereichs erläutert.)

Eigensinn und Beharrungskraft eines Gruppenhabitus (bspw. „Selbstverständnis als Soziologe“) stehen dem übergreifenden Zusammenschluss mehrerer Gruppen (Einzelwissenschaften) zu einem neuen Machtzentrum (Fachbereich) entgegen. „Den Schwierigkeiten des Zusammenlebens, die sich aufgrund der Verschiedenheiten des sozialen Habitus ergeben, suchen Menschen gewöhnlich dadurch zu entgehen, dass sie sich in der Nähe von anderen Angehörigen ihrer eigenen Gruppe, also von Personen mit dem gleichen sozialen Habitus, anzusiedeln versuchen.“

Gemäß dem „elementaren Verflechtungsschema“ zwingt aber eine fast unausweichliche Dynamik die Einzelwissenschaften zu einem neuen Verbund (Fachbereich) zusammen, der die Funktion einer „Überlebenseinheit“ übernimmt. Die Einzelwissenschaft verliert ihren Charakter als Überlebenseinheit[17] an den Fachbereich, aber der soziale Habitus bleibt auf die Wir-Identität „Einzelwissenschaft“ zugeschnitten.

Die öffentlichen Bildungs- und Erziehungseinrichtungen manipulieren die Gefühle so, dass sich ein ausschließlich auf die Eigengruppentradition (bspw. „Soziologie“) abgestelltes Wir-Gefühl vertieft und verfestigt. Es bildet sich ein Gewissen und ein Ethos der Bindung an die Soziologie, insoweit sie eine „Überlebenseinheit“ ist; sie zu verteidigen und ihre Mitglieder zu schützen und zu bevorzugen ist dann Pflicht und Notwendigkeit. Das Verschwinden der Gruppen-Funktion „autonome Überlebenseinheit“ würde für die Mitglieder „eine Sinnentleerung alles dessen bedeuten, was die vergangenen Generationen im Rahmen und im Namen dieser Überlebenseinheit getan und gelitten haben. ... [Es wirkt wie] eine Art des kollektiven Sterbens“ (Elias, 1987, 296), wie eine Todesdrohung, wie ein kollektiver Untergang – jedenfalls sofern die neu entstehenden übergreifenden Einheiten höherer Ordnung nicht emotional als Wir-Bild-Ersatz wahrgenommen werden.

Die Personen geraten so in einen Konflikt zwischen Institut und Fachbereich (wie anderswo zwischen Familie und Staat, oder zwischen zwei Generationen). Handeln sie nach ihrem Fachwissenschaft-Gewissen/Ethos, so heißt diese Bevorzugung von (*Geistes*-)Verwandten bei der Besetzung von Stellen „Gruppenegoismus“; im Konflikt zwischen Familie und Staat hieße sie Korruption, Vetternwirtschaft, Klüngel oder Seilschaft. Solche Konflikte ebben nach drei Generationen ab.

[17] Legitimationseinheit wäre hier vielleicht der passendere Begriff. Aber er bezeichnet das gleiche: Eine Wissenschaft, die nicht legitimiert ist, also etwa keine Arbeitsplätze zur Verfügung stellt, keine Ergebnisse erzeugt etc., wird nicht oder nur in Nischenstellungen „überleben“, vgl. Alchimie und Chemie; Astrologie und Astronomie.

6.2.2 Soziale Kontrolle: Reproduktion von Machtzentren

Betrachten wir im folgenden die Mechanismen der sozialen Kontrolle, d.h. Mechanismen zur Erzeugung, Reproduktion und sozialer Ausdehnung von Machtzentren.

Konkurrenz erzeugt angstvolle Kontrolle In jeder kohärenten bzw. homogenen Gruppe – das sind Gruppen, in denen Geldbesitz und Leistungsvermögen (Können) annähernd gleich verteilt sind und daher als Unterscheidungsmerkmale nichts taugen – spielt sich eine Macht- und Statuskonkurrenz um Prestige, Rang, Gunst, Karriere und sozialen Erfolg ab.

In jedem Gruppenmitglied erzeugt diese Konkurrenz, Angst[18] vor persönlicher Degradierung, Prestigeminderung, Verringerung des Ansehens – vor Macht- und Statusverlust (vgl. auch Abb. 6.9); diese Angst geht zurück auf jene ursprüngliche vor dem Verlust der Achtung der Eigengruppenmitglieder – kein Mitglied lässt kalt, was die anderen Mitglieder über es denken, weil sein Selbstbild und seine Selbstachtung davon abhängt. Die emotionale Logik der Gruppenzugehörigkeit ist zwingend.[19]

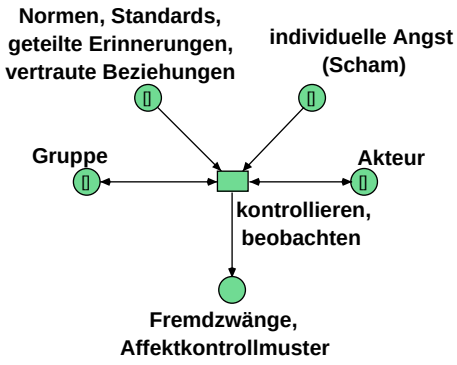


Abbildung 6.10: Gegenseitiges Beobachten von Gruppenmitgliedern

Die Angst vor dem Verlust von Status, Macht und Achtung motiviert die Gruppenmitglieder dazu, einander unablässig zu beobachten (vgl. Abb. 6.10). Sie müssen einander beobachten, um ihre eigene Position in der gesellschaftlichen Ordnung relativ zu den Positionen der anderen einschätzen zu können, und um dafür sorgen zu können, diese Position nicht zu schmälern oder zu verlieren, sondern im Gegenteil festigen und ausbauen zu können. Die genaue Kenntnis des Kurswertes der Akteure und ihrer Stellung im Geflecht der sozialen Meinungen sowie die genaue Differenzierung des eigenen Verhaltens entsprechend diesem Verflechtungswert werden zu unerlässlichen Voraussetzungen jeden sozialen Erfolges.

[18] bzw. bei etablierten Machtgruppen erscheint diese Angst als Angst vor dem „Auftrieb von unten“

[19] Elias setzt voraus, dass Menschen von ihrer biotisch-organischen Struktur her gruppenbezogen und auf eine soziale Umwelt existenziell angewiesen sind; deshalb kommen sie auch nur in Gruppen (Figurationen) vor.

Folglich bildet sich jedes Gruppenmitglied Meinungen über den Wert jeder Person, einschließlich seiner selbst, und zwar gemessen an ihrer Gunst und ihrem Einfluss beim Machtzentrum. Und: Um die eigene Position zu verbessern, geht es in dieser Konkurrenz temporäre, wechselnde Zweckkoalitionen ein, möglichst mit im Kurs hochrangigen Personen. Die persönliche Taktik der Kämpfe und Bündnisse „bedarf einer genauen Überlegung; Distanzierung und Näherung im Verhalten zu jedem anderem müssen genau dosiert werden; jeder Gruß, jedes Gespräch hat eine Bedeutung über das unmittelbar Gesagte oder Getane hinaus; sie zeigen den Kurswert der Menschen an, und sie tragen zur Bildung der höfischen Meinung über diesen Wert bei“ (Elias, 1976, 371).[20]

Gruppenmeinung als Medium und Mittel der Konkurrenz Wichtig ist, dass diese wertenden Meinungen durch Klatsch kommuniziert werden.[21] Klatsch verflicht individuelle Meinungen zu einer gewissermaßen „öffentlichen“ Gruppenmeinung. Und diese Gruppenmeinung wiederum beeinflusst über das persönliche Gewissen (Über-Ich) und die „Geschmackssicherheit“ der Mitglieder effektiv deren unbewusste psychische Selbststeuerung.

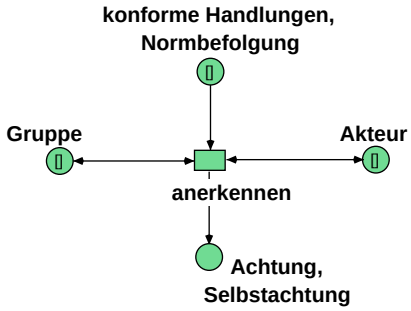


Abbildung 6.11: Anerkennung

Die Gruppenmeinung anerkennt, lobt und fördert immer den/das, der/was die Gruppennormen befolgt (vgl. Abb. 6.11).[22] Denn die Befolgung der Gruppennormen dient den Mitgliedern als soziale Kennmarke. Normbefolgung erhöht und festigt die Anerkennung („Lobklatsch“) anderer Gruppenmitglieder für den Normbefolger, festigt seinen Status und verschafft ihm Machtprämien. Etablierte Gruppenmitglieder festigen ihre Stellung, indem sie sich wiederholt zu den gemeinsamen Regeln bekennen. Der Preis, den eine Person für das Dazugehören in einer Gruppe entrichten muss, besteht folglich in der tatsächlichen Befolgung der gruppenspezifischen Normen, Tabus und Affektkontrollmuster bzw. der Unterwerfung des Verhaltens unter diese Normen, und in der Bereitschaft,

[20] Dieses für die höfische Gesellschaft typische Verhalten beobachten wir beinahe genau so in der Universität.

[21] Klatsch ist das wesentliche Mittel und Medium des sozialen Macht- und Konkurrenzkampfs, wenn physische Gewalt monopolisiert und tabuisiert ist.

[22] Dies impliziert, dass Normbefolgung und Gunst/Einfluss beim Machtzentrum beinahe gleichbedeutend sein müssen.

die Verpflichtungen zu übernehmen, die die Gruppenmitgliedschaft auferlegt. Das bedeutet Versagungen und einen Verlust an Spontaneität.

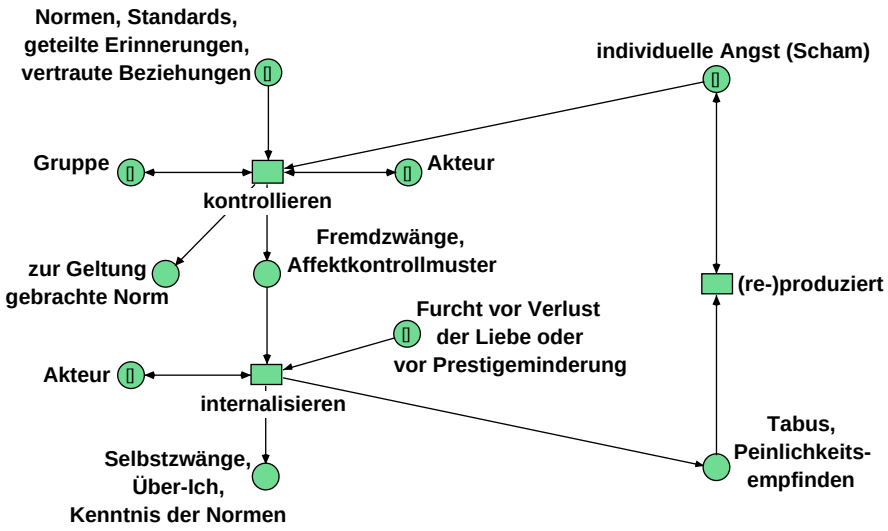


Abbildung 6.12: Reproduktionskreislauf: Gegenseitige Kontrolle und Normen

Wer dagegen von diesen Gruppennormen und -forderungen abweicht, wird von der Gruppenmeinung entsprechend negativ beurteilt: der Verstoßende selbst schämt sich, den anderen Akteuren ist dieser Verstoß peinlich (vgl. Abb. 6.12). Der Abweichler verliert etwas Macht und damit seinen Rang in der internen Macht- und Statuskonkurrenz. Personen, die die Gruppennormen dauerhaft nicht sehr streng befolgen, weniger diszipliniert sind und Tabus brechen, werden dann von den Normbefolgern mit Verachtung und Überheblichkeit als „Tieferstehende“ betrachtet. Norm- und „Tabubrüche [werden] zu Zeichen sozialer Unterlegenheit und Minderwertigkeit“ (Elias und Scotson, 1990, 243).

Periphere, die der Eigengruppe gar nicht oder nicht richtig angehören – Neuankömmlinge, Fremdgruppenzugehörige, Außenseiter – werden durch Klatsch im Machtzentrum bewertet, indem ihre „negativen“ Eigenschaften selektiv hervorgehoben werden. Man erzählt sich Vorfälle, die auf die Außenseiter ein schlechtes Licht werfen und das Eigengruppenverhalten, die eigene Moral etc. als überlegen erweisen. Schmäh- und Schimpfklatsch reicht von permanenter scharfer Ablehnung, Diskriminierung, Demütigung und Stigmatisierung über das Verwenden abschätziger „Kennworte“ und kalte Abweisung bis zum Kommunizieren „schlecht machender“, verzerrender Glaubensannahmen über die „anderen“, die gefühlsgeladene Wahrnehmungsmuster erzeugen.

Gruppenmeinungen, sich zusammensetzend aus Lobklatsch für die Dazugehörigen und Schimpfklatsch über „die Anderen“, erzeugen auf diese Weise soziale Grenzen (Kontakttabus) und setzen, bekräftigen und modifizieren Normen (vgl. Abb 6.13).[23] Die im Klatsch kommunizierte Gruppenmeinung wirkt als

[23] Diese Kontrolle ist um so stärker, je kleiner die Gruppe ist und je intimer die face-to-face-Beziehungen sind.

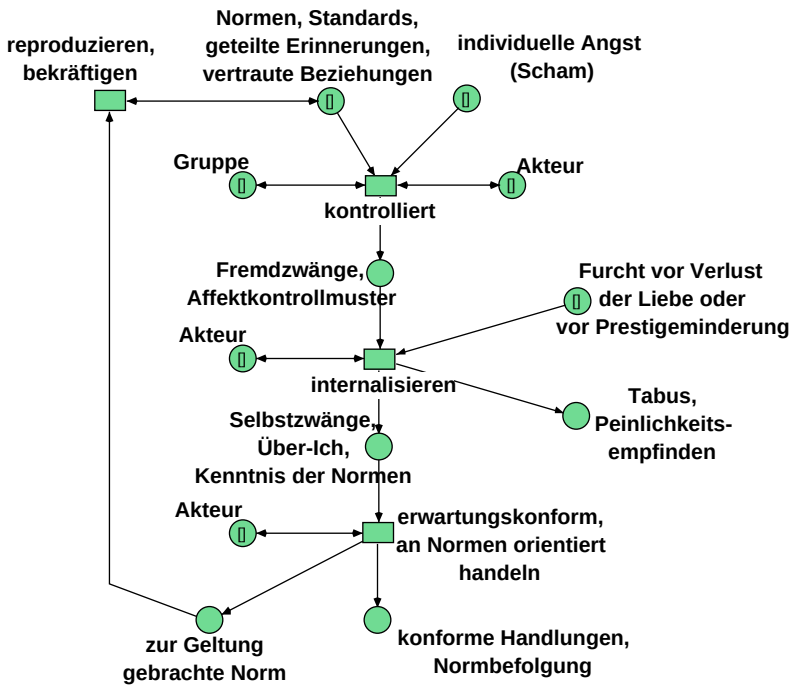


Abbildung 6.13: Reproduktionskreislauf: Achtungsbedürfnis und Verhaltensnormierung

Regulativ für Empfinden und Verhalten der Mitglieder; sie sichert „die ständige, gewohnheitsmäßige Wiedererzeugung des unterscheidenden Verhaltens und die strenge Triebregelung dahinter“ (Elias, 1976, 347).

Das bedeutet: Soziale Kontrolle entsteht und besteht letzthin genuin aus der gegenseitigen Beobachtung, Bewertung und Sanktionierung der einzelnen Akteure. Indem die Mitglieder sich selbst und gegenseitig streng hinsichtlich ihres Verhaltens überwachen und kontrollieren, bringen sie die Gruppennormen zur Geltung und gewährleisten, dass sich das Verhalten und Empfinden der Gruppenmitglieder an diesen Normen orientiert (vgl. die Zyklen der Reproduktion in Abb. 6.12 und 6.13).

Variationen individueller Normbefolgung und kollektiver Kontrollintensität
Daraus lässt sich ableiten: Die Art und Intensität der Normbefolgung (= Teilen der gemeinsam entwickelten und geteilten Lebensweise mit ihren Normen und Standards) durch eine Person bedingt (a) ihre Zugehörigkeit zur Gruppe; (b) ihre Stellung (Position) innerhalb der Gruppe; (c) die Achtung der anderen Gruppenmitglieder für sie *und* ihre Selbstachtung *und* die Achtung, die sie von anderen erwarten; (d) einen Teil ihrer persönlichen Identität, nämlich die Identität als Mitglied der Gruppe (u.a. indem sie sich persönlich mit der über ihre individuelle Existenz hinaus reichenden Vergangenheit, der Gruppengeschichte, identifiziert) (vgl. Abb. 6.9 und 6.11).

Die Intensität und Wirksamkeit gruppeninterner Kontrolle variiert mit der Wichtigkeit der Gruppe für das Überleben der Individuen.

Ist die Gruppe eine Überlebenseinheit, fungiert sie also für ihre Mitglieder als existenzieller (überlebensnotwendiger) Schutz und als Identitätsstifter (vor allem durch Kontinuität: kontinuierliche Sprachentwicklung, Legenden, Geschichte, Musik, Kulturgüter, die zugleich das kollektive Gedächtnis der Gruppe darstellen, in dem auch die Verstorbenen weiterleben), dann sind die gruppeninternen Beziehungen für die Mitglieder obligatorisch, lebenslänglich und fremdzwangartig. Sie können ihrer Gruppe kaum entkommen, gehören ihr auf Gedeih und Verderb an. Jedes Mitglied identifiziert sich selbstverständlich und notwendigerweise mit der Gruppe; bildet ein gruppenkonformes Gewissen und einen Ethos der Bindung an die Gruppe aus: die Gruppe zu verteidigen, ihre Mitglieder zu schützen und zu bevorzugen wird als Pflicht und Notwendigkeit empfunden.[24] Die Konkurrenzkämpfe sind in solchen Gruppen beinahe erstarrt unter institutionalisierten Hierarchien.

Haben Gruppen dagegen den Charakter freiwilliger Verbindungen auf Widerruf, mit geringerem internen Machtgefälle, dann sind die Beziehungen der Akteure in hohem Maße wandelbar. Man kann sich leicht lösen und neu binden, der Verpflichtungsgrad solcher Beziehungen ist verhandelbar. Freiwillige Vereinigungen stellen somit höhere Ansprüche an die Selbstregulierung der beteiligten Personen, die immer wieder prüfen müssen: „Wie stehen wir [jetzt, noch] zueinander?“ Konkurrenzkämpfe können hier eher offen ausgetragen werden und den institutionalisierten Rahmen verändern. Konflikte werden generell „lauter", also sichtbarer und offener, je geringer die Machtdifferenzen zwischen den beteiligten Parteien sind.

Strenge Verhaltensregelung als Herrschaftsmittel Mit der wechselseitigen Abhängigkeit in funktional differenzierten Gesellschaften intensiviert sich die wechselseitige Beobachtung der Akteure. Die Beobachtungsweise und das daraus entstehende Weltbild werden zunehmend weniger emotional, sondern stärker durch Erfahrung bestimmt; sie werden genauer und beziehen sich auf „längere Motivationsreihen und größere Zusammenhangsketten“.

Etablierte Machtzentren sind zur genauen Beobachtung ihrer sozialen Umwelt in besonderem Maße gezwungen. Sie erfüllen zentrale gesellschaftliche Koordinationsfunktionen; ihre soziale Position befindet sich in den Knotenpunkten des Verflechtungsnetzes von Aktionsketten. Diese Handlungsketten beobachtend zu überblicken und zu kontrollieren (Abb. 6.10) erfordert dauernd besonders hohe Anspannung und „Langsicht“ des Verhaltens.[25] Gerade durch diese besondere „Langsicht“ – Berechnen- und Planen-können, Traditionsbewusstsein, größere

[24] Das „Regelnetz“ solcher Gruppen ist sehr eng und ihre Führung diktatorisch. Ihre Mitglieder sind wenig individualisiert: sie haben weniger Spielraum für eigene Entscheidungen und Selbstregulierungen. Fällt dann die diktatorische Fremdregulierung aus, werden solcherart geprägte Personen desorientiert und verunsichert. Sie wünschen sich die Fremdregulierung zurück, eine „starke Führung“. Die Familie zieht wohl deshalb nach wie vor starkes Engagement und hohe Emotionalität der Individuen auf sich, weil sie eine solche Überlebenseinheit darstellt.

[25] Nicht nur an diesem Theorem zeigt sich Elias' Überzeugung, dass die soziale Position das Bewusstsein der Personen bestimmt.

Zusammenhänge überschauen etc. – unterscheiden sich Personen in Machtzentren von weniger Mächtigen.

Dazu kommt: Die etablierten Inhaber zentraler Machtpositionen haben etwas zu verlieren, sie fürchten den Verlust ihres Status und ihrer gehobenen Position besonders. Sie entwickeln einen besonderen „Drang, sich zu ‚unterscheiden' ... [, ein] Verlangen nach einem bestimmten, höheren Prestige" (Elias, 1976, 344). Denn: „In jeder Gesellschaftsschicht wird der Bezirk des Verhaltens, der gemäß ihrer Funktion für die Menschen dieser Schicht am lebenswichtigsten ist, auch am sorgfältigsten und intensivsten durchmodelliert." (Elias, 1976, 416). Und im Falle etablierter Machtzentren ist das überlebenswichtige Verhalten genau das, was die Mitglieder des Machtzentrums als Besondere hervorhebt und von den Mitgliedern der Peripherie unterscheidet.

Mit der differenzierteren Verhaltenscodierung, -steuerung und -kontrolle (vgl. Abb. 6.13, 6.12 und 6.9) werden sowohl die Verbote, Scham- und Peinlichkeitsgefühle in den Machtzentren differenzierter, umfassender und zahlreicher, als auch die Sensibilität, die Empfindlichkeit für Nuancen des Verhaltens (Gestik, Formen), das Erleben der Welt und des Selbst. Angehörige der Machtzentren entwickeln eine äußerste Sensibilität bzw. Empfindlichkeit für jede potenzielle Gefährdung ihres Status – für alles, was „an ihre vererblichen, ihre existenzbegründeten Privilegien rührt" (Elias, 1976, 414). Mit dieser Sensibilität beobachten sie nun aufmerksam die Außenseiter und Neuankömmlinge. Notwendig entdecken sie an ihnen sofort viele Züge (Eigenschaften, Verhaltensweisen), die einerseits ihr Feingefühl, ihren Sinn für emotional verankerte Werte (guten Geschmack, Schicklichkeit, Moral) oft tief verletzen, und die ihnen als Zeichen eines niedrigeren Ranges erscheinen.

Personen im Machtzentrum zwingen sich selbst und einander in besonderer Weise zur Befolgung ihrer Normen. Die genaue Befolgung macht ihren Stolz und ihre Selbstliebe aus; und sie ist – wie gesagt – notwendig, um sich weiterhin zu distinguieren und die eigene Machtposition zu sichern.

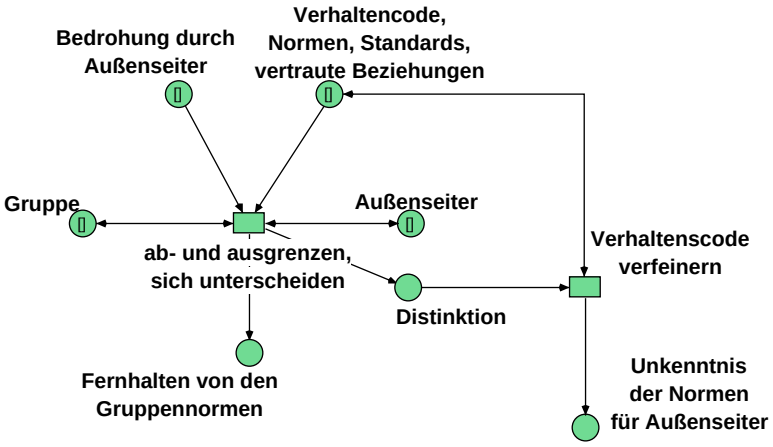


Abbildung 6.14: Verfeinerung des Verhaltenscodes

Das Mittel zum Machterhalt ist Distinktion durch Verhaltenssteuerung und

-disziplin (vgl. Abb. 6.14). Das Verhalten und Empfinden der Mitglieder der Machtzentren wird immer aufs Neue, immer spezifischer und strenger durchgeformt, gesteuert und modelliert. Der Verhaltenscode wird aufrecht erhalten und immer weiter verfeinert; das „gute" Benehmen und der „gute" Geschmack ständig bearbeitet und weiter geformt.

Ziel ist, dass sich das Verhalten der Mitglieder der Eigengruppe eindeutig vom Verhalten anderer Personen abhebt. Mitglieder etablierter Machtzentren erwarten entsprechend voneinander, stark differenzierte und genau umrissene Verpflichtungen und Standards einzuhalten und schwarze Schafe auszustoßen. Können Gruppen das nicht mehr, verfallen sie.[26]

Resultat ist, dass sich das Machtzentrum tatsächlich von anderen Personen und Gruppen durch einen Kanon traditionell vererbter besonderer Verhaltensmerkmale abhebt. Dieser Kanon bezeichnet das Geheimnis des guten Benehmens im gesellschaftlichen Verkehr. Es wird sichtbar an äußeren Rangabzeichen, Sprechweise und Art der Bewegungen, gesellschaftliche Vergnügungen und Verkehrsformen, die zur Gewohnheit der Gruppenmitglieder werden.

Die Strenge und Differenziertheit der Verhaltensregelung – umgesetzt als Ansich-Halten der Mitglieder des Machtzentrums – dient dann als Prestigewert bzw. -kennzeichen. Disziplinierte Normbefolgung wird zum Wert an sich, zum Zeichen der eigenen Überlegenheit. Die Strenge der Normenbefolgung, sprich die besondere Verhaltens- und Empfindensdisziplin, die die Gruppenmitglieder auszeichnet, (a) steigert deren Zusammengehörigkeitsgefühl und (b) erzeugt in ihnen das befriedigende Hochgefühl und Bewusstsein, einer besonderen, wertvollen Gruppe anzugehören. „Wir sind die besseren Menschen" ist das normale Selbstbild der Machtüberlegenen.

Soziales Alter etwa – pure Dauer der Existenz einer Gruppe und ihrer Normen und Tabus, pure Dauer der Zugehörigkeit eines Akteurs zu einer Gruppe[27] – gilt als hoher gesellschaftlicher Wert und dient als eine Quelle von Stolz und Befriedigung. Der Lohn (die „Lustprämie") eines Akteurs für seine Gruppenzugehörigkeit besteht generell in persönlichem Stolz darauf und persönlicher Befriedigung darüber, einer – nach allgemeiner Gruppenmeinung – guten, wertvollen, mächtigen, menschlich überlegenen Gruppe anzugehören und sie persönlich zu verkörpern; teil zu haben an der „Begnadung" eines überlegenen Gruppencharismas (vgl. dazu Abb. 6.9).

Die Teilhabe am höheren menschlichen Wert der Eigengruppe erhöht die Selbstliebe und Selbstachtung jedes Mitgliedes. Deshalb fühlen sich die Mitglieder der Gruppe verpflichtet; deshalb regulieren sie sich durch Selbstzwänge im Sinne der Gruppennormen und -standards.

[26] Um sich wirksam zu unterscheiden, legen sich Machtzentren einen sozialen „*Schutzgürtel*" an, eine Gruppe, dessen Funktion es ist, die Zentralherren gegen die unteren, aufstrebenden Schichten abzuschirmen, deren Mitglieder dafür freigestellt sind, an der gesellschaftlichen Unterscheidung zu arbeiten.

[27] Soziales Alter bezeichnet ein „Attribut [sozialer Beziehungen bzw.] ... einer sozialen Formation" (Elias und Scotson, 1990, 244): Eine alteingesessene, etablierte Gruppe leitet aus ihrem hohen Alter einen Anspruch auf Distinktion und Überlegenheit ab. Sozial alt ist dann eigentlich: distinguiert, überlegen, hervorstechend, ausgezeichnet. (Vgl. hierzu die Idee der „Ursprungsordnung" von Bert Hellinger). Soziales Alter ist eine Prestigequelle.

Machtzentrum stigmatisiert Außenseiter Die Selbsterhöhung eines Machtzentrums funktioniert so: Personen setzen die Eigenschaften ihrer Eigengruppe mit denen ihrer *vorgestellten* „besten", sich ideal verhaltenden Mitglieder gleich, idealisieren also ihre Gruppengemeinschaft. Gleichzeitig dämonisieren sie tendenziell die Eigenschaften von Fremdgruppen und identifizieren sie mit denen ihrer „schlechtesten", anomischsten Mitglieder („Pars-pro-toto-Verzerrung in entgegengesetzter Richtung").

Die Auffassung des Machtzentrums über Periphere lautet dann ungefähr: „Die gehorchen den (sc. unseren) Normen, Gesetzen und Zwängen nicht = sie alle (jeder einzelne) sind anomisch: unzuverlässig, undiszipliniert, gesetzlos" und, bei starkem Machtgefälle, im physischen und übertragenen Sinn unsauber, unrein. Die Angehörigen etablierter Machtzentren behandeln und stigmatisieren die Außenseiter somit vorweg wie bzw. als Menschen von geringerem Wert als sie selbst, indem sie glauben, sie seien von höherem, die anderen von geringerem menschlichen Wert (Qualität).

Die bloße Existenz von Personen, die Gruppennormen und -zwänge des Machtzentrums – seine Verhaltens- und Empfindenscodes und insbesondere die Standards der Selbstbeherrschung – nicht anerkennen (nicht respektieren, es mit ihnen scheinbar oder tatsächlich nicht so genau nehmen) und an den gemeinsamen Erinnerungen nicht teilhaben („das, was uns ausmacht, nicht ehren"), ärgert die Mitglieder des Machtzentrums: Sie nehmen die Existenz der Anderen als Angriff auf ihr „Wir-Ideal" wahr, empfinden es als Bedrohung ihres Status, ihrer Besonderheit und Höherwertigkeit (= ihres Gruppencharismas); als Angriff auf ihre monopolistische Verfügung über Machtquellen (Ämter und Freizeiteinrichtungen) – kurz, als Bedrohung der bestehenden Ordnung (vgl. Abb. 6.15).[28]

Kontakt mit den Peripheren birgt in den Augen der etablierten Mitglieder des Machtzentrums die Gefahr „anomischer Ansteckung": die eigene Abwehr gegen eigene normwidrige Wünsche könnte geschwächt werden – das hätte das Absinken des eigenen Prestiges in der Einschätzung des „Rests der Welt" und in der Selbsteinschätzung zur Folge, damit auch den Verlust von Macht und Achtung, also den Verlust der Quellen des Stolzes und der Befriedigung. Deshalb erregt der Verkehr mit Peripheren, die keinen „guten Geschmack" haben, sich „unangemessen verhalten", „zu emotional sind" etc. unangenehme Gefühle und Furcht in den Angehörigen des Machtzentrums. Wer also Kontakt zu Peripheren aufnimmt, gar etwas von deren „laxen" Verhaltensweisen übernimmt, erleidet innerhalb seiner Eigengruppe, dem Machtzentrum, Ansehensverluste.

Der wahre Kern der Furcht der Mitglieder der etablierten Machtgruppe ist, dass in dem Maße, in dem andere Gruppen die Verhaltensweisen der Etablierten übernehmen, diese Verhaltensweisen als Unterscheidungsmerkmale unbrauchbar werden. Um also die eigene Besonderheit und Überlegenheit auch weiterhin zu demonstrieren, müssen Machtzentren neue Unterscheidungsmerkmale entwickeln. Zusätzlich aber werten sie andere Gruppen offensiv ab. Sie vermeiden

[28] Das Bedrohtheitsgefühl wird im übrigen immer dann besonders virulent, wenn die Eigengruppe eine Überlebenseinheit ist, auf die das Individuum sich existenziell verwiesen fühlt und die sie um jeden Preis verteidigt. Im Falle eines „Abwehrkampfes" schließt die Gruppe entsprechend ihre Reihen: Sie verlangt verpflichtend von ihren Mitgliedern, alles, selbst ihr Leben zu geben, um die Eigengruppe zu verteidigen.

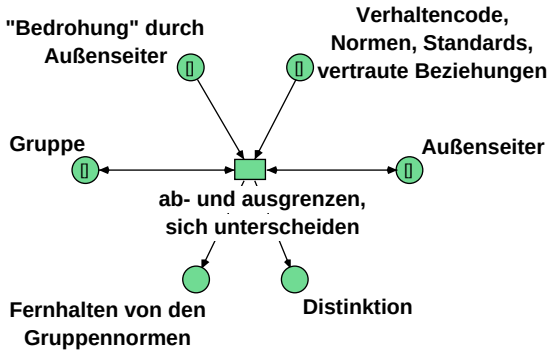


Abbildung 6.15: Ausgrenzung/Unterscheidung

soweit möglich den Kontakt zu den anderen Gruppen, schließen sie von gemeinsamen Zusammentreffen aus (s. Abb 6.15), werfen sie „alle in einen Topf“, d.h. sie deuten und behandeln sie als gleich-gültig. Indem sie die anderen so behandeln, schließen sie ihre Reihen und be-deuten den anderen, dass sie selbst sich als geschlossene Wir-Gruppe wahrnehmen. Sie schließen sich ein und ab gegen die anderen (vgl. Abb. 6.15).

Während aber die Machtgruppe die „anderen“ von der Teilhabe an den gruppenspezifischen Normen, Verhaltensweisen und Machtquellen ausschließt, wirft sie ihnen genau das vor und verachtet sie, *weil* sie die Normen nicht befolgen.[29] (Generell wirft sie ihnen gern dieselben Eigenschaften als negativ vor, die sie an sich selbst positiv bewerten.[30]) So wählt sie als besondere Beweise der Minderwertigkeit der Peripheren gern Zeichen, die durch die tatsächlich schlechtere Position der Peripheren und die damit verbundene Erniedrigung und Unterdrückung bedingt sind: Armut, niedriger Lebensstandard, Ausgeliefertsein an launische Entscheidungen und Befehle von oben, Demütigung des Ausschlusses aus besseren Kreisen, eingebläute Unterwürfigkeitshaltungen.

Offensichtliche Unterschiede etwa der Hautfarbe oder Sprache sind denn auch nur „Aufhänger“, an denen das „Minderwertigkeitentum“ sichtbar wird: Das soziale Stigma wird zu einem materiellen verdinglicht; dieses wird zum sichtbaren Zeichen der „Natürlichkeit“ oder „Gottgegebenheit“ der „objektiven“ Minderwertigkeit. Das entlastet die Etabliertengruppe nochmals von Schuld und rechtfertigt ihre Vormachtstellung.

So induzieren und führen Machtzentren einen dauernden Kampf um die Erhaltung der gehobenen Position; so machen sie die Peripheren erst zu minderwertigen Außenseitern bzw. bestätigen ihnen ihr „Außenseitertum“ (vgl. Abb. 6.16).

[29] So kommt es, dass das Verhalten in Machtzentren normalerweise tatsächlich ordentlicher, umsichtiger, sauberer und solidarischer ist als in der Peripherie. Denn „ordentlicher, umsichtiger“ etc. heißt nur: strenger an den Normen orientiert und „langsichtiger“: genauer und umsichtiger berechnet, von genauerer Kenntnis um die machtrelevanten Sachverhalte getragen.

[30] „Einer der aufschlussreichsten Züge in der Strategie etablierter Gruppen ist ihre Neigung, den Außenseitern, als Vorwurf, Einstellungen nachzusagen, die zum eigenen Einstellungsrepertoire der Etablierten zählen und hier oft genug Lob einbringen.“ (Elias und Scotson, 1990, 49)

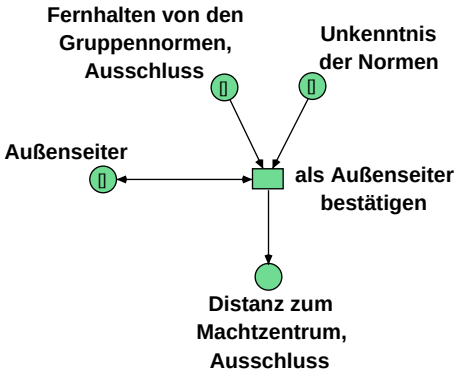


Abbildung 6.16: Außenseiter werden als solche bestätigt

Die sich bedroht fühlende Gruppe wird auf diese Weise zum wirklichen Aggressor, sie ist es, die andere Gruppen angreift bis hin zur Vernichtungsabsicht.[31]

Eine solche Stigmatisierung kann aber nur dann wirksam gelingen, wenn die Personen, die sie betreiben, Machtpositionen besetzt halten, zu denen die Peripheren keinen Zugang haben. Nur etablierte Machtzentren können (bei drohendem Machtverlust) die bestehenden Zwänge verschärfen. Periphere können den Machtzentren nicht annähernd mit gleicher Münze heimzahlen: ihre „Schimpfnamen“ für die Etablierten „stechen“ diese nicht. Stächen sie, dann kündigte sich eine Verschiebung des Machtverhältnisses an; die Außenseiter erzielten erste Erfolge beim Gegen-Stigmatisieren.

Kennzeichen der Außenseiter Für diese Entwicklung ist es nicht notwendig, dass die Außenseiter tatsächlich anstreben, die etablierte soziale Ordnung zu stören oder dass sie tatsächlich relevante Unterschiede zu den Mitgliedern der Machtgruppe aufweisen. Das tatsächliche Verhalten, die wirklichen Eigenschaften und Absichten der Peripheren / Neuankömmlinge sind für den Prozess der Selbstorganisation und -sicherung etablierter Machtzentren kaum relevant. So werden Fremde, die in eine Sozialformation eintreten und dort verbleiben, von den Etablierten in die bestehenden Beziehungsmuster („Figurationen“) eingeordnet, und sei es in Form des Ausgeschlossenwerdens als Außenseiter. Die Logik, nach der sie behandelt, gedeutet und eingeordnet werden, bleibt ihnen dabei

[31] So entsteht die „eigentümliche Zwiespältigkeit der Nationalstaaten als Überlebenseinheiten und Vernichtungseinheiten.“ (Elias, 1987, 278) Sie „erwecken .. ständig den Eindruck, daß sie selbst, die sich bedroht Fühlenden, nun zugleich auch die Bedroher derer sind, von denen sie sich bedroht fühlen. Die ständige Rollenvertauschung, die bedrohte Staaten zu bedrohenden werden lässt, macht zugleich aus den erhofften Überlebenseinheiten unbeabsichtigterweise potentielle oder auch aktuelle Vernichtungseinheiten. Das gilt nicht nur in bezug auf die Angehörigen gegnerischer Staaten, sondern auch in bezug auf die Bürger des eigenen Staates. Die spezifische Doppelzüngigkeit des nationalen Credos beruht nicht zuletzt darauf, dass sich mit der Funktion des Staates als Überlebenseinheit, als Beschützer und Garant der Sicherheit des einzelnen Staatsangehörigen, zugleich der Anspruch verbindet, von den Einzelnen die Bereitschaft zur Vernichtung ihres Lebens, die Verpflichtung zum Tode zu fordern, wenn das den Regierenden für die Sicherheit der gesamten Nation erforderlich zu sein scheint.“ (Elias, 1987, 278)

unbegreiflich. Es ist ihnen unmöglich, sich dieser Fremdzuschreibung zu entziehen.

Was Neuankömmlinge (die sich auch untereinander fremd sind, über keine gemeinsame Vergangenheit verfügen und nur lockere Kontakte haben) und die Mitglieder funktional peripherer (unterer) Gruppen / Sektoren ohne individuelle Aufstiegschancen tatsächlich kennzeichnet, ist zunächst nur ihre große soziale Distanz zum Machtzentrum – mit der geringe soziale Wirksamkeit und geringe Machtchancen einher gehen (s. Abb. 6.17).

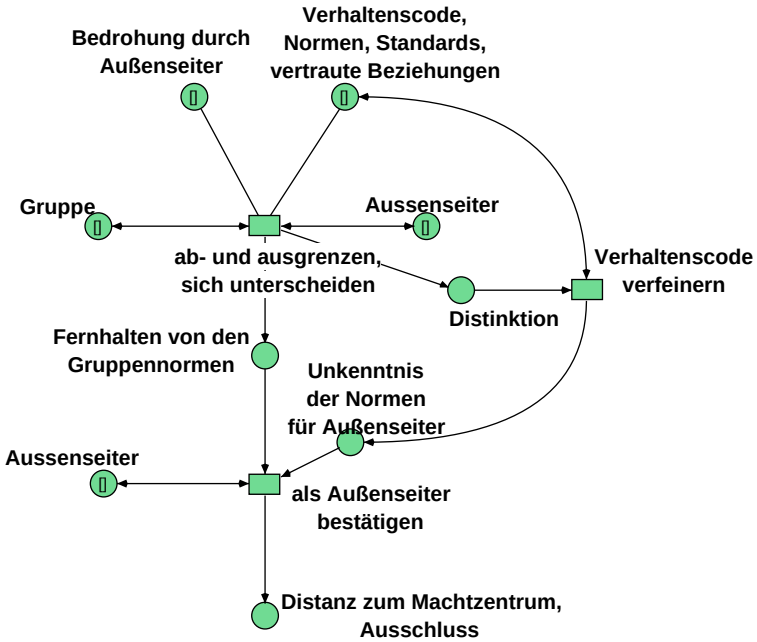


Abbildung 6.17: Distinktion erzeugt Distanz zum Machtzentrum

Selbstabwertung der Außenseiter Bei steilem Machtgefälle gilt: „Gib einer Gruppe einen schlechten Namen, und sie wird ihm nachkommen.“ Das Machtzentrum bringt die Außenseiter selbst zu der Überzeugung, sie seien die schlechteren (minderwertigen, weniger respektablen) Menschen. Die Außenseiter übernehmen dann das Bild, das die Etablierten von ihnen haben, und glauben daran; sie messen sich am Maßstab der Etablierten und empfinden sich als minderwertig, da sie deren Normen nicht genügen. Sie erleben ihre geringere Macht dann emotional als Zeichen ihres geringeren Werts.

Der Grund für die Wehrlosigkeit der Abweichenden oder Außenseiter gegen die Überlegenheitsgesten der Etablierten ist: Die Überlegenen befinden sich im Einklang mit dem eigenen Über-Ich. Die „unterlegene“ Person(engruppe) aber tut etwas, das im Widerspruch steht (a) zu dem Selbstkontrollsektor des eigenen Bewusstseins (Über-Ich) und (b) zu Menschen, mit denen sie verbunden war oder ist bzw. der herrschenden gesellschaftlichen Meinung. Eine innere Stimme

der Unterlegenen ist in diesem Fall Verbündeter der Etablierten: Sie lehnen sich selbst ab, meiden einander, betreiben Selbstausschluss aus Machtpositionen.

Diese über Generationen weitergegebene Erfahrung des Geschnitten- und Ausgeschlossenwerdens, der Kränkungen der Selbstachtung ist den Verachteten allerdings Ansporn zur Rache. Ob sie diese rebellierend ausüben, oder ob sie ihre Diskriminierung resignierend hinnehmen, ist situationsabhängig. Wenn sie sich wehren, sind ihre einzigen Mittel zur Rache Delinquenz, Vandalismus und Verstöße gegen das geltende Recht:[32] Sie benehmen sich genau so und tun „extra“ genau das, was die respektablen Machtzentrumsmitglieder nicht mögen und ihnen vorwerfen. Sie realisieren die Stereotypen, die ihnen zugeschrieben werden. Die Verachteten übernehmen damit fremddefinierte „abweichende“ soziale Rollen als ihre eigene Identität, bestätigen darin ihre Feindschaft gegen die Autorität des Machtzentrums (vgl. Abb. 6.17), schwächen aber ihre eigene Position.

So kann es sein, dass Periphere das Bewusstsein entwickeln, im Verhältnis zu anderen Schichten eine „im Guten wie im Bösen wohlunterschiedene Stellung“ zu haben. Sie stellen dann keinen über ihre soziale Position hinausgehenden Prestigeanspruch, sondern äußern klare Unterordnungs- und Widerstandsgesten. Nur bei ungünstigen „Fernwirkungen“ reagieren sie entsprechend mit Unruhe, Aufruhr, Affektentladungen – ohne nachhaltigen Erfolg. Ansonsten leben sie in ihrer eigenen Welt mit eigenen Sitten und Gebräuchen. Sie regulieren ihr Verhalten allerdings weniger differenziert als die Oberschichten: geben ihren Affekten und Trieben unmittelbarer nach, geben ihnen mehr Spielraum; ihr Verhalten ist „gröber“ und einheitlicher. Insgesamt können sie die Verflechtungen, in denen sie sich befinden, weder selbst beeinflussen noch selbst erkennen. Sie erleben sich als passive Objekte von Interdependenzen, die von fernen Ereignissen in Mitleidenschaft gezogen werden, und sind in der Regel direkt-unmittelbaren körperlichen Bedrohungen „durch Schwert, Elend und Hunger“ ausgesetzt.

Das etablierte Machtzentrum wird nicht mehr als solches problematisiert – es ist ein Gewohnheitsphänomen geworden, eine alteingesessene, „gewachsene“ Gruppe, deren Mitglieder über längere Zeit am selben Ort zusammenleben und -arbeiten, und die eben einen hohen Grad an Gruppenzusammenhalt erzeugen und reproduzieren.

Der Gruppenzusammenhalt ist gekennzeichnet durch (a) die Gemeinsamkeit der Lebensweise mit ihrem Standards- und Normenkanon; (b) gemeinsamen Erinnerungen an gemeinsam geteilte Vergangenheit (gemeinsam geteilte Geschichte), die in Form von Anekdoten und Legenden präsent gehalten wird; (c) emotionale Vertrautheit in bekannten Freund- und Feindschafts-Verhältnissen [Sympathie- und Antipathiehaltungen] und einer entwickelten Rang- und Hackordnung. Gruppenmitglieder können dabei durchaus untereinander verfeindet sein, gegenüber Außenseitern halten sie zusammen.

Zusammengefasst: Der Grad an Zusammenhalt einer Gruppe ist gleichbedeutend mit dem Grad der Befolgung gemeinsamer Normen durch die Gruppenmitglieder (s. Abb. 6.18, die eine Vergröberung von Abb. 6.13 darstellt).

[32] ein Ausscheren aus der Ordnung, das aber paradoxerweise die angegriffenen Machtzentren noch stärker zusammenschweißt und auf der Ordnung beharren lässt.

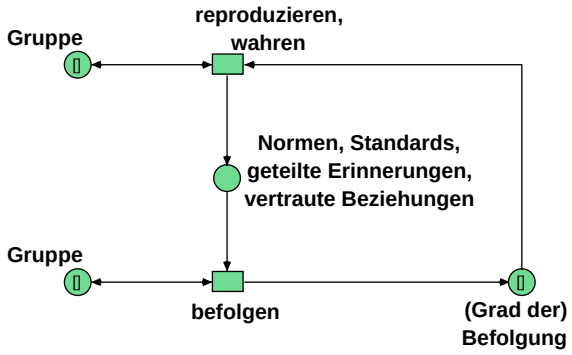


Abbildung 6.18: Reproduktion eines Machtzentrums

Die Machtüberlegenheit einer Gruppe beruht auf „Figurationsaspekten“, die den Ausschluss der Peripheren von Machtchancen gewährleisten: (a) dem stärkeren Zusammenhalt (höheren Integrationsgrad, stärkerer Kohäsion) der Etablierten, (b) der Aktivierung des ohnehin größeren Zusammenhaltspotenzials durch soziale Kontakte, (c) dem Ausschluss der Anderen aus zentralen sozialen Machtpositionen (etwa Ämtern, diese werden für die eigenen Leute reserviert). (d) Das wiederum verstärkt den Zusammenhalt.

Machtzentren entwickeln sich und bleiben bestehen, wenn und insofern sie ihre Machtquellen (Besitz, Ämter, Fertigkeiten) monopolisieren und über Generationen hinweg vererben können.

Theoretische Folgerung Die Mechanismen der Konkurrenz und Kontrolle zwischen Gruppen und der Konkurrenz und Kontrolle innerhalb einer Gruppe sind strukturell dieselben. Sie werden durch die Verhältnisse der beteiligten Akteure erzeugt, unabhängig davon, ob diese Akteure Personen oder Gruppen sind. Sie entstehen aus der gegenseitigen Kontrolle der Konkurrierenden innerhalb einer Gruppe und aus deren gemeinsamer gegenseitiger Selbstkontrolle gegenüber den Peripheren. Entsprechend sind die Mechanismen der kollektiven Behandlung innerer Abweichler (abweichender Mitglieder) strukturell dieselben wie die der Behandlung von Außenseitern – nur unter unterschiedlichen „grundsätzlichen“ Vorzeichen. Die Personen werden lediglich mit unterschiedlichen Ausgangseigenschaften versehen, je nachdem, ob die der Eigen- oder der Fremdgruppe zugehören.

Ausdehnung und Verallgemeinerung des Machtmonopols Gesellschaftliche Konkurrenz zwischen „verteilten Monopolen“ erzeugt einen „Auftrieb“ breiterer, unterer Schichten und ihrer Verhaltensweisen.

Das hoch differenzierte, arbeitsteilige gesellschaftliche „Getriebe“ ist zunehmend darauf angewiesen, dass auch die funktional peripheren (unteren) Schichten ihr Verhalten „aus der Einsicht in langfristigere und fernerliegende Verflechtungen regeln“, damit sie weiter ihre zunehmend komplexen gesellschaftlichen Aufgaben erfüllen können (Elias, 1976, 340). Die Erfüllung ihrer gesellschaft-

lichen Funktionen zwingen zunehmend auch Mitglieder unterer Schichten zum Antrainieren derselben Langsicht und zurückhaltenden Berechnung, die aus dem Verhalten der Machtzentren schon bekannt ist. Das Machtzentrum wird gleichzeitig mehr und mehr von den unteren Schichten funktional abhängig. Und: weil die gesellschaftliche Arbeit durch die Funktionsteilung produktiver („ergiebiger“) wird, hebt sich schubweise der Lebensstandard immer breiterer Bevölkerungsschichten.[33] Außenseiter und Neuankömmlinge tendieren deshalb dazu, Positionsverbesserungen anzustreben und Machtdifferenzen zu verringern.

Die Notwendigkeit, augenblickliche Affekte fernerliegenden Zwecken unterzuordnen, breitet sich immer auf die gleiche Weise aus: zunächst erfasst sie kleinere Spitzengruppen, dann immer breitere Schichten. Die aufstrebenden Schichten erzielen dabei regelmäßig Erfolge im sozialen Machtkampf: Sie nehmen selbst die Funktion und Haltung einer „Oberschicht“, eines Machtzentrums, gegenüber weiteren aufstrebenden Schichten ein.

Die unteren Schichten gleichen sich im Verhalten den oberen an. Sie gewinnen an gesellschaftlicher Stärke, die Kontraste werden eingeebnet, das Ausmaß der gegenseitigen Abhängigkeit gesellschaftlicher Akteure wird größer und ausgeglichener und die Spielarten / Schattierungen zivilisierten Verhaltens zahlreicher. Diese Angleichung vollzieht sich in zwei Phasen.

(1) Kolonisations- oder Assimilationsphase Die untere und breitere Schicht steigt auf. Sie ist in ihren Idealen, Ideen, Verhaltenscodes und Affektregulierungen, wenngleich widerstrebend, am Vorbild der oberen orientiert und von ihr abhängig. Die Aufsteiger sind dem Machtzentrum also zunächst noch deutlich unterlegen.

Das liegt in erster Linie daran, dass die Aufsteiger ein Über-Ich haben, das nach dem Muster des Verhaltens der Machthaber bzw. der Oberschicht gebildet ist. Das Über-Ich der Aufsteigenden ist strenger, rigoroser und unausgeglichener als das der Oberschichtmitglieder; ihr Verhalten in gewisser Weise ungeformt und gebrochen. Es zeigt bzw. verrät „die gewaltige Anspannung, die der individuelle Aufstieg erfordert; und es verleugnet noch weniger die ständige Bedrohung von unten, wie von oben, das Kreuzfeuer von allen Seiten, dem die individuell Aufsteigenden ausgesetzt sind.“ Die Imitation der Oberschicht-Modelle gelingt nicht völlig, sie bleibt vielmehr als solche erkennbar: als Anspruch etwas zu sein, was man nicht ist, als Unsicherheit des Verhaltens und des Geschmacks („Verkitschung“; „Halbbildung“). Die fehlschlagende Imitation resultiert in „spezifischen Verkrümmungen des Bewusstseins und der Haltung“ und in einer „sonderbaren Falschheit und Unförmigkeit“ – in spezifischen Scham- und Unterlegenheitsgefühlen.

(2) Vermischungs- und Emanzipationsphase Bei jedem Aufstiegsschub durchdringen und amalgamieren sich die Verhaltensweisen der oberen und der unteren, aufsteigenden Schichten; letztere nehmen an gesellschaftlicher Stärke zu und heben ihren Lebensstandard in Richtung der oberen Schicht. Die aufstei-

[33] Eine These, die Ulrich Beck als „Fahrstuhleffekt“ vor einiger Zeit wieder prominent gemacht hat.

gende Schicht durchsetzt also das Machtzentrum mit ihren Verhaltensweisen. Sie setzt entschiedener und bewusster eigene Verhaltenscodes („Gebots- und Verbotstafeln“) ein und durch. Damit drängt sie die obere Gruppe zu betonterer Abschließung und stärkerem An-sich-Halten, aber diese Abwehrschlacht ist zum Scheitern verurteilt. Die Kontraste und Spannungen in der Gesellschaft verstärken sich. Die aufstrebende Schicht gewinnt an gesellschaftlicher Stärke und Selbstbewusstsein. Die Verhaltensweisen des Machtzentrums und der aufstrebenden Schicht vermischen sich; in bestimmten Verhaltenssphären werden Verhaltensregeln gestrafft, in anderen gelockert bzw. vergröbert. Ein neues, einheitliches Verhaltensschema entsteht.[34]

Mögliche zusätzliche Selbstschwächung des Machtzentrums Ein Machtzentrum kann sich selbst schwächen, wenn es seine Beobachtungsfähigkeit verliert und, etwa, „größenwahnsinnig“ wird. Es schätzt dann seine Machtquellen falsch ein; ihre Mitglieder fühlen nicht, dass sich die sozialen Verhältnisse geändert haben und dass es Gegenbeweise gegen die eigene Besonderheit oder Auserwähltheit oder Erhabenheit gibt. Der Glaube an das Gruppencharisma samt dazugehörigen Einstellungen und Verhaltensstrategien bleibt bestehen und verhindert die Anpassung von Gruppenselbstbild und -strategie an die veränderte Realität: das Gruppenselbstbild wird unrealistischer. Die Aktionen des Machtzentrums werden dann zerstörerisch, oder die Gruppe kapselt sich ein und stellt ihre Veränderung still. So behält sie vielleicht die Merkmale einer „Überlebenseinheit“ (bedingungslose Unterordnung und Loyalität der Personen gegenüber der Gruppe), wird aber existenziell davon abhängig, ob das inzwischen entstandene übergeordnete Machtzentrum, etwa der Staat, sie duldet oder sogar ihnen eine Funktion zuweist. Wenn das nicht der Fall ist, „haben die Außenseiter keine Funktion für die etablierten Gruppen; sie stehen einfach im Weg und werden daher oft genug ausgerottet oder vertrieben und dem Tod überlassen.“ (Elias und Scotson, 1990, 28)

Ergebnis der Angleichung: ein neues, größeres Machtzentrum Alle Personen und Funktionsgruppen werden langfristig immer gleichmäßiger funktional abhängig voneinander („Interdependenz großer Menschengruppen“). Privilegien werden vernichtet, Verhaltensweisen gleichen sich an. Am Ende schließen sie sich zu einers größeren Oberschicht / Funktionszentrale zusammen, die nun ihrerseits andere periphere soziale Einheiten „beherrscht“. Das neue Verhaltensschema ist ein Amalgam der Verhaltenscodes der alten Oberschicht und der ehemaligen Aufsteiger. Es entspricht dann in seinem Aufbau der Geschichte ihres Aufstiegs, d.h. der Struktur der gesellschaftlichen Auseinandersetzungen.

[34] Schema der Gebote, Verbote, Triebe und des Verhaltens; „Nationalcharakter“

6.3 Pierre Bourdieu: Symbolkampf und Habitus/Feld[35]

Die Ergebnisse von Reanalyse und Modellierung der Theorie Pierre Bourdieus, die in diesem Kapitel dargestellt werden, gleichen vom Charakter her dem vorigen Kapitel. Der entscheidende Unterschied besteht darin, dass die sozionische Theoriedarstellung und -modellierung weiter entwickelt ist. Äußeres Anzeichen dafür ist, dass die Petrinetzmodelle bereits von ihrer Gestalt her eine größere Vielfalt aufweisen und die theoretischen Aussagen weniger linear wiedergeben.

Bourdieus Theorie kann in drei inhaltliche Komplexe untergliedert werden, die per se keinen eindeutigen Zusammenhang aufweisen. Wir beginnen mit der Darstellung der Kapitaltheorie, die Gesellschaft als Produkt von Auseinandersetzungen sozialer Klassen um die Verteilung von Kapital konzipiert und Kapital als durch diese Auseinandersetzungen erzeugte Verteilungsstruktur ansieht (6.3.1). Die Theorie der Habitus-Feld-Dialektik stellt gesellschaftliche Praxis als in Felder gegliedert vor, wobei jedes Feld einen Habitus erzeugt, den die Personen inkorporieren, die in ihm geboren werden, und der die dem Feld eigenen Mechanismen reproduziert (6.3.2). Für den dritten „Theorie-Teil“ könnte man vielleicht das Schlagwort „Institutionalisierungs-Ideologisierungs-Dialektik“ wählen; er befasst sich mit der Erzeugung sozialer Herrschaftsordnungen und ihrer gleichzeitigen Verschleierung (6.3.3).

6.3.1 Gesellschaftsstruktur als Produkt sozialer Auseinandersetzungen

Bourdieu begreift Gesellschaft als Prozess sozialer Auseinandersetzungen um symbolisches und ökonomisches Kapital[36]. Entsprechend ist die aktuelle Gesellschaftsstruktur – das ist die gegenwärtige Verteilung von Kapital und damit von Ansehen, Macht und Lebensstilen – Resultat und Bilanz symbolischer Auseinandersetzungen. Gesellschaftsstruktur ist gewissermaßen der aktuelle Spielstand in den sozialen Auseinandersetzungen, eine Momentaufnahme der Kräfteverhältnisse zwischen sozialen Akteuren[37]. Die Struktur der Kapitalverteilung befindet sich ständig in Bewegung, ihre Gleichgewichtszustände, so stabil sie auch erscheinen mögen, sind vorläufig.

[35] Dieser Abschnitt basiert auf der gemeinsamen Arbeit mit meinem Kollegen Roman Langer und stellt eine Überarbeitung von (Köhler u. a., 2003a) dar. Das Textmanuskript stammt dabei von Roman Langer, auf dessen Basis von Michael Köhler die Modelle entwickelt wurden.

[36] Konsequent definiert Bourdieu: „Gegenstand der Sozialwissenschaft ist eine Wirklichkeit, die alle individuellen und kollektiven Kämpfe umfasst, welche die Wirklichkeit bewahren oder verändern wollen, und besonders die, bei denen es um die Durchsetzung der legitimen Definition der Wirklichkeit geht und deren symbolische Wirkung dazu beitragen kann, die bestehende Ordnung, d.h. die Wirklichkeit, zu erhalten oder zu untergraben.“ (Bourdieu, 1993, 258).

[37] Den Begriff „Akteur“ benutzt Bourdieu nicht, um die falsche Assoziation zu vermeiden, soziale Einheiten würden handelnden Personen gleichen. Gleichwohl spricht Bourdieu von Gruppen, Klassen und Klassenfraktionen, die in ständigen sozialen Auseinandersetzungen stehen. Wir sehen es deshalb als gerechtfertigt an, den Begriff „Akteur“ in einem weiten Sinne zu verwenden.

Der Gegenstand sozialer Kämpfe ist symbolisches Kapital (soziale Anerkennung)

Soziale Akteure streben in dieser Welt sozialer Kämpfe (vgl. Abb. 6.19) danach, möglichst viel Kapital anzuhäufen und gegen andere Akteure zu verteidigen. Die gesamte soziale Praxis ist auf „materielle oder symbolische Profitmaximierung ausgerichtet“ (Bourdieu, 1993, 222). Der gemeinsame Nenner aller praktischen Aktivitäten ist das Streben nach exklusiver Aneignung symbolischen Kapitals. Denn die Verfügung über Kapital steigert das Handlungsvermögen, die Chancen zum gestaltenden Eingriff ins Soziale. Was ist also symbolisches Kapital, um welchen Gegenstand drehen sich soziale Kämpfe?

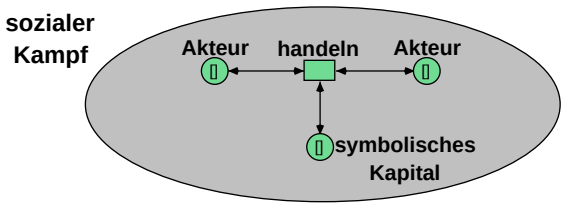


Abbildung 6.19: Der Gegenstand sozialer Kämpfe ist symbolisches Kapital

Symbolisches Kapital besteht aus distinktiven Eigenschaften, aus Zeichen symbolischen Reichtums und sozialer Anerkennung. Das sind symbolische Eigenschaften, die eine distinktive Wirkung haben, die also dazu beitragen, dass sich ein sozialer Akteur von anderen Akteuren unterscheiden kann (im folgenden kurz: Symbole). Sie machen soziale Unterschiede und Ränge sichtbar.

Denn distinktive Eigenschaften steigern die Seltenheit eines Akteurs und heben ihn von den anderen Akteuren als einen besonderen ab. Symbolisches Kapital sichert seinem Inhaber somit einen Gewinn an positiver oder negativer Hervorhebung, einen Gewinn an Distinktion.

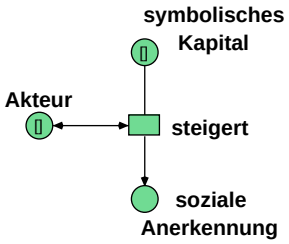


Abbildung 6.20: Die Verfügung über distinktive Symbole steigert die soziale Anerkennung

Die Verfügung über distinktive Symbole steigert damit die soziale Anerkennung[38], die den Verfügenden zukommt (vgl. Abb. 6.20). Wer mehr symbolisches

[38] Der Begriff der Anerkennung wird hier kontraintuitiverweise wertneutral gebraucht. Es ist also etwa möglich, anzuerkennen, dass jemand ein Miethai, ein Idiot, ein Parasit etc. ist. Dieses Anerkennen ist also immer auch ein Zuerkennen, ein Zuschreiben.

Kapital hat – also prominente, bedeutende (Repräsentanten von) Gruppen – der wird sozial stärker wahrgenommen, dessen Existenz, Besonderheit und dessen Verfügung über symbolisches Kapital wird massiv anerkannt.[39] Somit symbolisieren distinktive Symbole immer zugleich die Fähigkeit zur Aneignung gesellschaftlichen Kapitals, und sie ziehen eine Alles-oder-nichts-Grenze zwischen den Verfügenden und den Nichtverfügenden.[40]

All das ist ein distinktives Symbol, was innerhalb der sozialen Welt zu praktischer Anerkennung und sozialer Distinktion führt: zu Glauben, Kredit und Misskredit, zu Wahrnehmung und Wertung, zu Erkennen und Anerkennen. Allen Dingen und Praktiken wohnen, so gesehen, Distinktionsmerkmale inne. Ihren jeweiligen distinktiven Wert – ihre grundlegende soziale Be-Deutung – beziehen sie aus ihrer relativen Stellung im Gesamtsystem distinktiver Symbole.

Typische Unterscheidungsmerkmale symbolischen Reichtums bzw. Embleme sozialer Anerkennung sind: Kleider, Wohnung, Attribute legitimer Autorität, Hochzeit, Gabentausch, gegenseitige Einladung zum Mahl.

Bourdieu merkt metaphorisch an, dass die Rendite symbolischen Kapitals steigerbar ist. Es wirft um so höhere Rendite an Hervorhebung ab, (a) je seltener die verwendeten Symbole sind, je exklusiver ihre Aneignung ist. Die Rendite sinkt, je häufiger und verbreiteter, je gewöhnlicher und zugänglicher die Symbole werden. Sie steigt wiederum (b) je mehr sich die Akteure vorstellen, dass vornehmes / hervorragendes Verhalten leicht fällt und selbstverständlich ist, die Aneignungskosten also minimal sind.

Der Maximalprofit an Hervorhebung ist höchste Vornehmheit.

Symbolische Auseinandersetzungen sind Kämpfe um „richtiges Leben“

Akteure versuchen, den Distinktionsgrad oder den relativen Wert ihrer Eigenschaften im Verhältnis zu allen anderen Eigenschaften aller anderen Akteure zu steigern. Das sind zunächst immer die, die man schon hat: Man möchte die eigene soziale Position und die eigenen Merkmale repräsentieren und als richtigen Handlungs- und Lebensstil legitimieren lassen und damit sozial durchsetzen. Folglich kämpfen soziale Gruppen / Klassen um (vgl. Abb. 6.21):

1. die *Definition* der distinktiven Eigenschaften bzw. Symbole (was ist denn nun wertvoll und was wertlos?). Die Kämpfe tragen durch ihre Konkurrenzlogik zu der „Seltenheit“ von Gütern / sozialen Stellungen und zum Glauben an ihren „Wert“ bei, d.h. sie verstärken den Glauben, dass die knappen Güter per se wertvoll und das menschliche Interesse an ihnen natürlich seien. Damit verstärken sie die Hervorhebung der Gruppen, die

[39] Noch einmal anders gesagt: es handelt sich um be-zeichnende oder aus-zeichnende bzw. ausgezeichnete Merkmale, Verhaltensweisen, Praktiken, Gegenstände, Dinge, Vorteile, Pflichten, Güter (vor allem legitime Kulturgüter, knappe Güter und Luxusgüter), ein Name, ein Ruf, Prestige, Ehre, Ruhm, Autorität.

[40] Wie oft bei Bourdieu schimmert auch hier unverkennbar Marx durch, der die Klassenzugehörigkeit von Personen anhand ihrer Stellung im Produktionsprozess, d. h. der Nicht-/Verfügung über Produktionsmittel bestimmte. Die Entgegensetzung von symbolischem (bzw. kulturellem und sozialem) und ökonomischem Kapital entspricht der Basis-Überbau-Trennung.

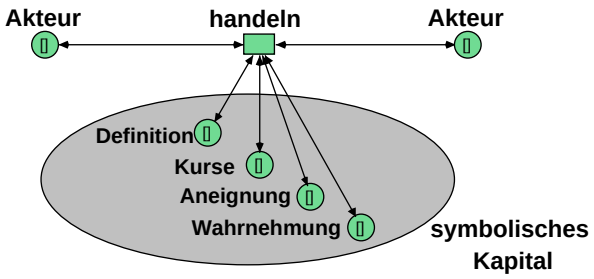


Abbildung 6.21: Sozialen Definition richtigen Lebens

durch ihre seltene Stellung in der Gesellschaftsstruktur ohnehin schon hervorgehoben sind;

2. die Prinzipien der Distinktion, also die Maßstäbe oder Kriterien, an denen gesellschaftlicher Wert bemessen wird – die *Wechselkurse* der Symbole;

3. die Prinzipien / Kriterien, nach denen distinktive Eigenschaften (Güter, Praktiken) den Personen oder Gruppen zugeordnet werden (sollen), und damit darum, wie und wo Gruppengrenzen gezogen werden;

4. die Art und Weise, wie man sich die distinktiven Eigenschaften „richtig“ anzueignen hat (*legitime Aneignungsweise*), und welche Arten der Aneignung illegitim oder verboten sind. Damit geht es auch darum, welche Waffen man im Kampf um Anerkennung verwenden darf und welche nicht, welche Einsätze man bringen darf/soll/muss und welche nicht;

5. die Art und Weise, auf die das entstehende Kräfteverhältnis wahrgenommen (beschrieben) werden darf (*legitime Wahrnehmung*). Hier geht es also auch um die soziale Bestimmung der legitimen Basis von Herrschaft (Wer herrscht zu Recht? Was darf/muss man tun, um „richtig“ zu herrschen?) – und damit darüber, wer die legitime Verfügungsgewalt über die Verteilung und Umverteilung sozialer Profite haben soll. Es geht um „das, was symbolische zu verbindlicher Macht werden lässt“.

Es geht also um die Durchsetzung der sozialen Definition (= legitimierte und sanktionierte offizielle Vor- und Darstellung des) richtigen Lebens; darum, wie die soziale Welt „richtig“ gestaltet werden soll, und welche Eigenschaften entsprechend anstrebenswert sind.

Institutionalisiertes kulturelles Kapital: Bildungstitel

Typische distinktive Symbole (die bereits fast vollständig verdinglicht und institutionalisiert wurden) sind Bildungstitel. Ihr Wert ist durch Konvention festgelegt, außerdem formalrechtlich garantiert und dadurch von lokalen Schranken und vorübergehenden Schwankungen seiner sozialen Geltung frei. Ein Bildungstitel ist demnach eine objektivierte soziale Blanko-Anerkennung für persönlich

inkorporiertes symbolisches Kapital (hier in Form kultureller Kompetenz) irgendeines austauschbaren Trägers.

Für die aktuellen Träger eines Bildungstitels entfällt der ständige Beweiszwang, dass sie über kulturelles Kapital verfügen: Sie tragen ihren kollektiven Kredit in Form des Titels mit sich herum.

Bedingungen der Nutzung symbolischen Kapitals und damit der Steigerung des Profits: Übertragung und Akkumulation von Kapital

Das juristische Eigentum an symbolischem Kapital ist über seine materiellen Träger übertragbar. Ein Bildungstitel etwa wird verliehen. Das heißt aber noch nicht, dass er auch zur Steigerung des persönlichen Anerkennungsprofits verwendet werden kann.

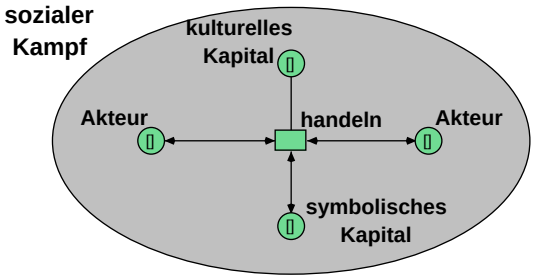


Abbildung 6.22: Kapital kann nur dann genutzt werden, wenn man das erforderliche kulturelle Kapital besitzt

Denn Kapital kann grundsätzlich nur dann genutzt werden, wenn man (a) das für die Aneignung und Nutzung von Kapital selbst wiederum erforderliche kulturelle Kapital[41] besitzt oder (b) sich die Inhaber dieses Kulturkapitals dienstbar machen kann (vgl. Abb. 6.22).

Folglich entspricht der Profit eines Akteurs dem Grad seiner Fähigkeiten zur Beherrschung und Nutzung objektivierten symbolischen Kapitals (also seinem inkorporierten kulturellen Kapital).

Beispiele Man kann sich ein Kunstwerk kaufen, aber das bedeutet noch lange nicht, dass man so darüber reden kann, dass die Kunstszene einen als feinsinnigen und schöngeistigen Kunstkenner anerkennt. Lottogewinner, die nicht über das kulturelle „Know-How“ verfügen, wie man Geld für sich arbeiten lässt, und keine Beziehungen zu Leuten haben, die über dies „Know-How“ verfügen (soziales Kapital), verjubeln beispielsweise in recht kurzer Zeit ihr Geld. Ein Hochstapler aber, etwa ein „falscher Arzt“, der mit seinem angemaßten Bildungstitel jahrelang unentdeckt praktiziert, ist nicht nur ein Beweis dafür, wie gut der Bildungstitel als institutionalisierter kollektiver Kredit

[41] Über Bourdieu hinaus gehend werden hier kulturelles, soziales und ökonomisches Kapital als Differenzierungen des grundlegenden symbolischen Kapitals verstanden. Dies ergab die Analyse der bourdieuschen Bestimmungen von „Kapital“ als aus distinktiven Symbolen bestehend. Die unterschiedlichen Kapitalsorten können fortan als spezielle Ausformungen symbolischen Kapitals mit spezifischen Symbolsprachen gelten. Bourdieu selbst hat vor einiger Zeit (in Bourdieu, 1998) lediglich eine Sonderstellung des symbolischen Kapitals konzediert, das die anderen Kapitalsorten verstärken oder abschwächen könne.

funktioniert, sondern verfügt auch über genügend kulturelles Kapital, diesen Titel zu seinem Vorteil nutzen zu können.

Um Kapital nutzen zu können, muss man es zunächst erwerben. Die Akkumulation (bzw. der Erwerb) von Kapital bedarf generell der Investition von (a) Zeit, (b) Arbeit an der Herstellung und Pflege sozialer Beziehungen und (c) vorhandenem Kapital. Arbeitszeit ist demnach das Äquivalenzmaß für verschiedene Kapitalsorten.

Symbolisches Kapital wird in der Primärgruppe, vor allem der Familie, übertragen (durch „Erziehungsinvestition“), also vererbt.

Wie weit die erbliche Übertragung von Kapital möglich ist und gelingt, hängt davon ab, über wie viel und welches symbolische Kapital die Primärgruppe selbst verfügt. Der schulische Erfolg sowie dessen ökonomische und soziale Erträge eines Heranwachsenden sind ihrerseits abhängig davon, wie viel von ihrem Kapital die Primärgruppe in die Erziehung investiert. Wo die einfache familiäre Sozialisation deckungsgleich mit der Akkumulation von Kapital ist, sind die durchschnittlichen Aussichten des Nachkömmlings auf sozialen, ökonomischen und kulturellen Erfolg am größten.

Die Produktion symbolischen Kapitals und die Reproduktion sozialer Akteure

Symbolisches Kapital wirkt aber nicht nur trennend, sondern auch vereinigend. Soziale Distinktion und Solidarität sind konstitutiv gleichursprünglich (vgl. Abb. 6.23).

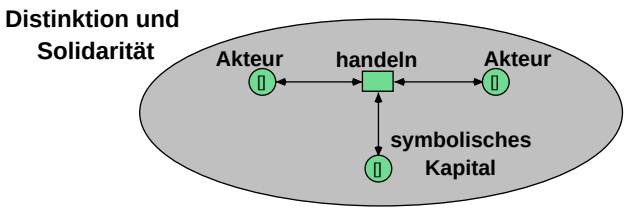


Abbildung 6.23: Symbolisches Kapital sichert seinem Inhaber einen Gewinn an positiver oder negativer Hervorhebung, einen Gewinn an Distinktion.

Die Produktion symbolischen Kapitals ist eine kollektive Angelegenheit. Vereinzelte Akteure[42] – also einzelne Personen, Gruppen sowie Klassen – können keinen kollektiven Kredit erzeugen; er stellt sich vielmehr durch praktische Anerkennung von etwas oder jemandem als wertvoll her.

Der Kampf um soziale Unterschiede und Unterscheidungen verhilft bestimmt Produkten, Praktiken und Eigenschaften dazu, gruppen- und klassendifferenzierend – eben unterscheidend – zu wirken und damit zu symbolischem Kapital

[42] Bourdieu spricht statt von Gruppen oft von „Klassen“. Wir setzen Gruppe im Sinne von „soziale Einheit“.

zu werden.[43] Im Zuge sozialer Auseinandersetzungen und Austauschprozesse werden Dinge und Verhaltensweisen, die an sich bedeutungsfrei und sozial indifferent sind, in Zeichen der praktischen Anerkennung umgewandelt, und damit in getrennte und sozial trennende Symbole. Dies geschieht einfach dadurch, dass sie als solche behandelt werden.

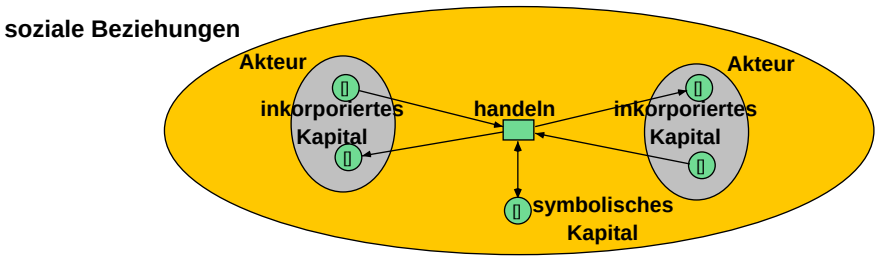


Abbildung 6.24: Soziale Beziehungen beruhen auf dem Austausch materieller und/oder symbolischer Güter

Ein Netz an sozialen Beziehungen bspw. wird erschaffen und erhalten, indem man zufällige Beziehungen, sofern sie unmittelbaren Nutzen versprechen, strategisch in solche verwandelt, die als besonders und ausgewählt gelten und rechtliche und/oder moralische Verpflichtungen nach sich ziehen. Solche Beziehungen beruhen auf dem Austausch materieller und/oder symbolischer Güter (vgl. Abb. 6.24). Soziale Akteure (Gruppen oder Klassen) reproduzieren ihre Beziehungen, und damit sich selbst, durch ständigen internen sichtbaren Gebrauch und Austausch solcher Güter. Da sich soziale Akteure im Verhältnis zu ihren Bezugsobjekten selbst konstituieren, sind sie von der Existenz dieser Bezugsobjekte existenziell abhängig. Die Verfügung über „sein“ symbolisches Kapital, über „seine“ soziale Anerkennung durch andere und durch sich selbst, ist für jeden Akteur unabdingbar.

Die gegenseitige Anerkennung impliziert immer auch die Anerkennung der Gruppenzugehörigkeit und der Homogenität der Gruppe, weil die Grenzen des Mitteilens, miteinander Teilens und gemeinsamen Gebrauchens sozialer Anerkennung zugleich die Grenzen der Gruppe selbst ziehen. Jedes Gruppenmitglied ist, insofern es an den Gruppenbeziehungen und am symbolischen Kapital der Gruppe teilhat, nolens volens zugleich Wächter über die Gruppengrenzen.[44]

Benutzt ein Gruppenmitglied etwa die in der Gruppe üblichen Gemeinbegriffe, so drückt es darin die Identität der Gruppe und ihre Differenz gegen andere Gruppen mit aus. Denn es handelt sich in jedem Fall um gruppenspezifische

[43] Produzenten stellen solche Produkte her, die mit den klassen- und positionsgebundenen Interessen der klassen- bzw. gruppengleichen Konsumenten übereinstimmen. Im Ergebnis wird die bestehende Gesellschaftsstruktur dadurch bestärkt, dass es „für jeden Geschmack etwas gibt“.

[44] Jeder Neuzugang kann die Definition der Zugangskriterien bzw. die Grenzen des als legitim geltenden Austauschs potenziell verändern. Deshalb ist Heiraten eine so wichtige Gruppenangelegenheit. Auch heute noch, wo Gruppenendogamie inzwischen kaum noch über ausdrücklichen Familieneingriff, sondern über die freie Wahl des/der Geliebten gewährleistet bleibt, die nur scheinbar frei ist, weil sie vom Habitus getroffen wird.

Begriffe, die außerhalb der Gruppe entweder nicht bekannt sind, oder die von anderen Gruppen mit einer anderen Bedeutung versehen werden, oder die zwar auch außerhalb der Gruppe die gleiche Bedeutung haben, aber unterschiedliche Werte.[45] In seinen unscheinbaren, alltäglichen Äußerungen – in Sprachgebrauch und Verhaltensweise, Lebensstil und Körperhaltung, kurz: in ihrem Habitus – drückt das Gruppenmitglied, ebenfalls ohne es bewusst zu wollen oder zu bemerken, grundlegende Überzeugungen und tiefsitzende Werte seiner Gruppe aus. Diese Äußerungen dienen der Gruppe als Erkennungszeichen und Gedächtnisstütze.[46]

Die Solidarität der Gruppe beruht auf konkreten (materiellen oder symbolischen) Profiten, die ihre Mitglieder aus ihrer Gruppenzugehörigkeit schlagen können. Gruppen, die solche Profite nicht geben können, zerfallen.

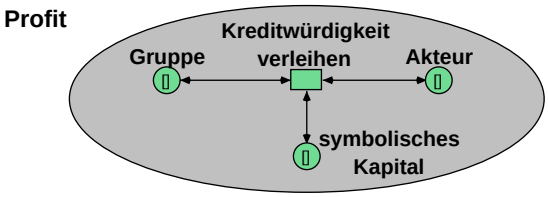


Abbildung 6.25: Die Gruppe verleiht ihren Mitgliedern mittels ihres Gesamt-Kapitals weit mehr Kreditwürdigkeit und damit mehr sozialen Erfolg

So verleiht sie ihren Mitgliedern mittels ihres (übertragbaren) Gesamt-Kapitals z.B. weit mehr Kreditwürdigkeit, und damit mehr sozialen Erfolg bzw. Wirkung, als diese einzeln je erlangen könnten (vgl. Abb. 6.25). Denn jedes Mitglied der Gruppe verfügt über soziales Kapital; definiert als die Gesamtheit der aktuellen und potenziellen Ressourcen, die auf der Zugehörigkeit zu einer Gruppe beruhen. Und genau darauf kann das Mitglied zurückgreifen, insofern es den Namen der Gruppe trägt und ihre Symbole verwendet.

6.3.2 Habitus und sozialer Sinn, Feld und Logik der Praxis

Bisher wurde nur angedeutet, dass Kapital in inkorporierter und in objektivierter Form existiert. Diese Dialektik soll im folgenden expliziert werden. Soziale Praxis ist ein dialektisches Gefüge aus (a) objektivierten, vergegenständlichten Strukturen: objektiven Existenzbedingungen, insbesondere Institutionen und (b) einverleibten Strukturen: den Habitusformen. Beide sind Resultat (opus operatum) und Produktionsweise (modus operandi) herrschender Praxis. Denn

[45] So ist „harte, ehrliche Arbeit“ im Sinne von Mühsal in der individualistischen Kultur der Oberschicht niedriger angesehen als in der kollektivistischen der Unterschicht, „unkonventionelle Ideen / Kreativität“ dafür höher.

[46] Jeder Position im sozialen Raum entsprechen bestimmte unausdrückliche Prämissen und Werte. Und: jede Gruppe neigt dazu, ihre Werte und damit ihre eigene Geltung als höher/tiefer (richtiger) gegenüber allen anderen Gruppen(werten) anzusehen. Auch das verstärkt die Distinktion.

die Strukturen der Praxis sind trivialerweise Erzeugnisse der historischen Praxis, wirkende Präsenz der kollektiven Geschichte. Sie werden in jeder Handlung wirksam, bestimmen diese und schließen sie zu Feldern zusammen.

Praxisfelder und ihre Logik

Bourdieu bestimmt „Feld“[47] als „Kampfschauplatz[,] .. als System objektiver Beziehungen, worin die Positionen und Standpunkte relational bestimmt sind und das selbst noch die Kämpfe um seine Veränderung determiniert: nur im Kontext des Spiel-Raums ... werden die individuellen wie kollektiven, die spontanen wie organisierten Strategien verständlich, die auf Bewahrung oder Wandel ... abzielen.“ (Bourdieu, 1987, 261)

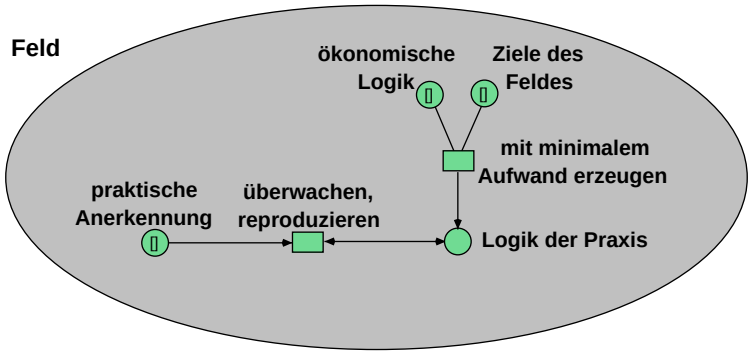


Abbildung 6.26: Felder und Logik der Praxis

Felder sind selbstständige Praxiswelten. Sie funktionieren nach strengen Mechanismen, die zusammen eine spezifische „Logik der Praxis“ bilden. Sie definiert die Grenzen des Feldes durch explizite und spezifische Regeln und konstruiert so seine raumzeitliche Besonderheit und Beschränkung. Felder überwachen und reproduzieren ihre Grenzen, indem sie Spielverderber bestrafen oder ausschließen und Neuankömmlingen Eingangsrituale und Prüfungen abfordern (vgl. Abb. 6.26). Symbolische Praktiken sind außerdem in Statusbarrieren objektiviert und durch juristische Abgrenzungen sanktioniert, die jedem individuellen Streben nach weiterer Kapitalakkumulation Grenzen setzen.

So fordern sie den praktischen Glauben (das praktische Anerkennen) stillschweigend als Eintrittsgeld. Der Glaube an die Feld-Praxis und ihre Fetische ist daher entscheidend dafür, ob man zu einem Feld gehört.

Glauben ist nicht Wissen. Die Logik der Praxis bleibt implizit, also den Akteuren unbewusst. Sie könnten gewissermaßen ihre eigenen Spielregeln nicht rezitieren, obgleich sie sicher nach ihnen handeln. Weil die Praxislogik damit

[47] Der Begriff „Feld“ ist wie viele Bourdieusche Begriffe nicht klar gefasst und wird, wie Florian (1998) richtig anmerkt, inflationär verwendet. Bourdieu verwendet aber für den gesellschaftlichen Prozess oft die Spielmetapher, er betrachtet die symbolischen Auseinandersetzungen wie Spiele. Spiele werden auf Spielfeldern gespielt – dies Bild sollte man sich vor Augen halten, wenn man über soziale Felder im bourdieuschen Verständnis spricht. Eine Definition, die aus bourdieuschen Texten entnommen wurden, liefert der Text im folgenden.

einer bewussten Kontrolle durch logische Systematisierung entzogen bleibt, ist sie ungefähr und verschwommen. Praktische Logiken sind wenig systematische Produkte eines Systems von Erzeugungsprinzipien, die auf den Praxisfeldern wirksam sind. Sie sind in sich geschlossen und funktionieren, obwohl bzw. weil sie im Sinne reiner Logik widersprüchlich und „unlogisch“ sind. Praktische Logik kann bspw. ein und dasselbe Objekt in unterschiedlichen Situationen völlig unterschiedlich auffassen.

Eins aber eint alle Praktiken: sie gehorchen alle einer ökonomischen Logik, „die ihren ‚Ursprung‘ weder in ‚Entscheidungen‘ der Vernunft als bewusster Berechnung noch in den Bestimmtheiten der äußerlichen und den Handelnden übergeordneten Mechanismen findet. Da sie für die Struktur der rationalen Praxis konstitutiv, d.h. bestgeeignet ist, die in der Logik eines bestimmten Feldes enthaltenen Ziele mit dem geringsten Aufwand zu erreichen, kann diese Ökonomie in bezug auf alle möglichen Funktionen definiert werden“ (Bourdieu, 1993, 95). Die Ökonomie der Logik der Praxis lautet einfach: es wird nicht mehr Logik und Handlung aufgewendet, als für die Erfüllung meiner Bedürfnisse erforderlich ist (vgl. Abb. 6.26).

Das Feld zwingt den Akteuren seine Gestalt und seine Notwendigkeiten auf

Die Logik eines Feldes legt fest, welche Symbole in diesem Feld wertvoll, wirksam, effizient und relevant sind, und weist damit Akteuren auf Grund ihrer Merkmale (ihres symbolischen Gesamtkapitals) ihren sozialen Rang und ihre besonderen Verfügungsgewalten zu. Über den Habitus weist es den Akteuren sogar ihren jeweiligen Platz in der Interaktion zu (und die nehmen ihre Plätze gleichsam „automatisch“ ein). Es stellt die Koordinationspraktiken und Interaktionsformen zur Verfügung, die überhaupt nur benutzt werden können (vgl. Abb. 6.27).

Abbildung 6.27: Das Feld weist dem Akteur den Habitus zu

Diese sind für die Akteure dann unmittelbar verständlich – selbstverständlich – mithin vorherseh- und berechenbar. Sie können diese habituellen Praktiken quasi absichtslos, unabsichtlich, nichtintentional erzeugen und entziffern. Mit dem praktischen Sinn, der wie ein Instinkt funktioniert, kann jede „Situation auf der Stelle, mit einem Blick und in der Hitze des Gefechts, eingeschätzt und sogleich die passende Antwort gegeben werden.“ (Bourdieu, 1993, 190). Damit gibt der praktische Sinn den Akteuren Richtung und Orientierung, folglich sichere Zukunft in ihrem Feld.

Wie die objektiven Existenzbedingungen eines Feldes Akteure prägen, kann man sich am Sozialisationsprozess verdeutlichen. Akteure, die in ein Feld hineingeboren sind, erlernen unmerklich das System sozialer Regeln oder Symbole, indem sie regelmäßig regelgemäß bzw. symbolisch handeln. Sie lernen, *in* diesem Regel- bzw. Symbolsystem zu denken, sprechen, handeln – nicht *mit* ihm.

Dabei machen sie im Handeln die stumme Erfahrung, dass ihre Welt (die objektiven Strukturen des sozialen Raums) selbstverständlich ist, so wie sie ist. Sie erfahren, wie hier gehandelt und gedacht wird (werden darf) und was man zu tun und zu lassen hat – und sie halten sich daran, verhalten sich entsprechend. Das heißt: die ersten Erfahrungen, die ein Akteur[48] macht, prägen die Grundstrukturen seines Habitus, die wesentlichen Züge seiner Wahrnehmungs-, Denk- und Handlungsschemata (vgl. Abb. 6.28).

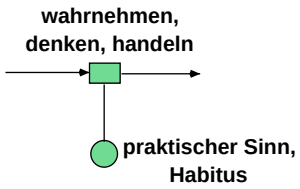


Abbildung 6.28: Der Habitus bestimmt das Wahrnehmen, Denken und Handeln des Akteurs

Das subjektive Ergebnis der Praxiserfahrung ist der habituelle praktische Sinn. Er ist das einverleibte praktische Beherrschen der spezifischen Regelmäßigkeiten des Feldes; der subjektive Sinn für die eigentümliche objektive Logik der Praxis und zugleich inkorporierter Teil dieser Logik. Jedem Individuum, das in ein Feld hineingeboren wird und darin aufwächst, wird dieser praktische Sinn mitgegeben, es hat teil an der objektiven Logik der Praxis. Deshalb erscheint ihm „alles, was dort [in der Welt seiner Gruppe] vorgeht, sinnvoll[49], d.h. sinnerfüllt und objektiv in eine vernünftige Richtung weisend." (Bourdieu, 1993, 122). Der praktische Sinn verleiht der Welt in den Augen der Akteure also Bedeutung und Daseinsgrund.

Nehmen wir den inkorporierten praktischen Sinn, den Habitus[50], genauer unter die Lupe.

Der Habitus: Erzeugungsschema für Praxis und inkorporiertes symbolisches Kapital

Der Habitus ist ein Schema dauerhafter und übertragbarer kognitiver und motivationaler Dispositionen, also Einstellungen und innerer Haltungen zur Welt. Damit ist er eine Kombination aus Fähigkeiten zur symbolischen Aneignung

[48] Akteur kann hier – wie üblich – eine Person sein, aber auch eine soziale Gruppe - oder eine neu gegründete Organisation.

[49] „sinnvoll" heißt: in einem verstehbaren Verhältnis zueinander und den Bedingungen der eigenen Ausführung stehen.

[50] Es ist nicht ganz klar, in welchem Verhältnis praktischer Sinn und Habitus stehen. Da aber Bourdieu sich schon durch seine Buchtitel deutlich auf Kant bezieht, den „Alltagsverstand" in die Nähe des praktischen Sinns und des Habitus rückt, und da ‚praktische Vernunft' oder Praktischer Sinn sich mit „kognitive und motivationale Dispositionen" gut übersetzen lassen, verwenden wir die Begriffe hier annähernd synonym.

kultureller Güter.[51] Er ist das umfassende Verhältnis der Akteure zur sozialen Welt und kommt in Körperhaltung, Auftreten und Verhalten zum Ausdruck.

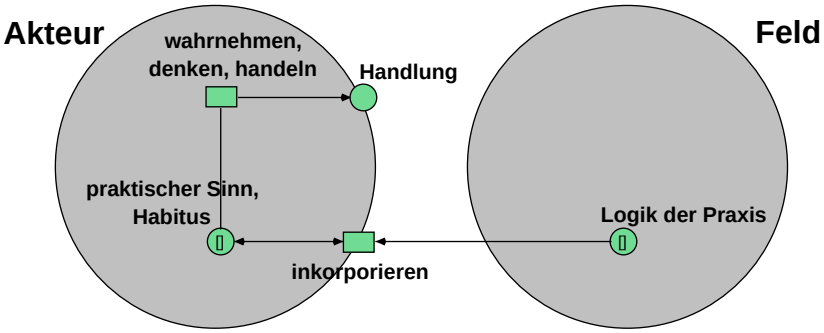


Abbildung 6.29: Akteure inkorporieren die Logik der Praxis als praktischen Sinn/Habitus

Der Habitus bildet also das inkorporierte (einverleibte) symbolische Kapital einer Person. Akteure erwerben ihren Habitus durch Prägungs- und Aneignungsarbeit (vgl. Abb. 6.29). Durch sie prägen sie den Habitus in ihre Leiber. Dieser Inkorporierungsprozess kostet wie jede Kapitalakkumulation Zeit und Arbeit, die persönlich investiert werden muss.[52]

Folglich ist der Habitus körpergebunden, also unablösbar von einem individuellen Organismus. Dennoch ist er nichts individuelles, er ist Ausdruck und Widerspiegelung der Klasse (oder Gruppe). Er ist subjektiv nur insofern, als er von konkreten Personen einverleibt werden muss und andernfalls nicht existierte, ansonsten bleibt er ein überindividuelles System verinnerlichter Strukturen, Wahrnehmungs-, Denk- und Handlungsschemata.[53]

So ein Habitus-Schema erzeugt, konditioniert und ordnet Gedanken, Vorstellungen, Wahrnehmungen, Beurteilungen aller späteren Erfahrung, Äußerungen und Handlungen, „Auswahlentscheidungen“, Praktiken und Vorstellungen – mit einem Wort: die gesamte Praxis eines Akteurs.

Geschmack – ein Teil des Habitus und ein Mittel zur sozialen Distinktion

Ein zentraler Bestandteil des Habitus ist der Geschmack (vgl. Abb. 6.30).[54] In einer Welt symbolischer Auseinandersetzungen müssen Akteure grundsätzlich

[51] vom Genuss eines Gemäldes über den Gebrauch einer Maschine bis zum Sprechen der Muttersprache

[52] Darüber hinaus bedarf er noch einer sozial konstituierten libido sciendi: man „bildet sich“.

[53] Es gibt dann zwar vielfältige individuelle Dispositionen, doch handelt es sich hier nur um die Vielfalt innerhalb der Homogenität des Gruppenhabitus. „Jedes System individueller Dispositionen ist eine strukturale Variante der anderen Systeme, in der die Einzigartigkeit der Stellung innerhalb der Klasse und des Lebenslaufs zum Ausdruck kommt. Der ‚eigene‘ Stil ... ist ... immer nur eine Abwandlung“ des Stils einer Klasse oder Epoche.“ (Bourdieu, 1993, 112/113)

[54] Diesen Begriff benutzt Bourdieu in einem weiten Sinn; er umfasst z. B. auch moralische Gefühle bzw. Rechtsgefühle, politische Weltanschauungen etc.

darauf achten, was ihnen gehört und zusteht und was anderen gehört und zusteht. Bourdieu veranschlagt deshalb genau diese Unterscheidungsaktivitäten als soziale Basistätigkeiten. Die soziale Welt ist strukturiert nach einer grundlegenden und allgemein anerkannten Unterscheidung zwischen (a) dem, was – aus der Sicht eines Akteurs – (zu) ihm gehört, was ihm zusteht, für ihn erreichbar und anstrebenswert ist, und (b) dem, was nicht ihm, sondern anderen Akteuren zusteht, ihnen gehört etc.

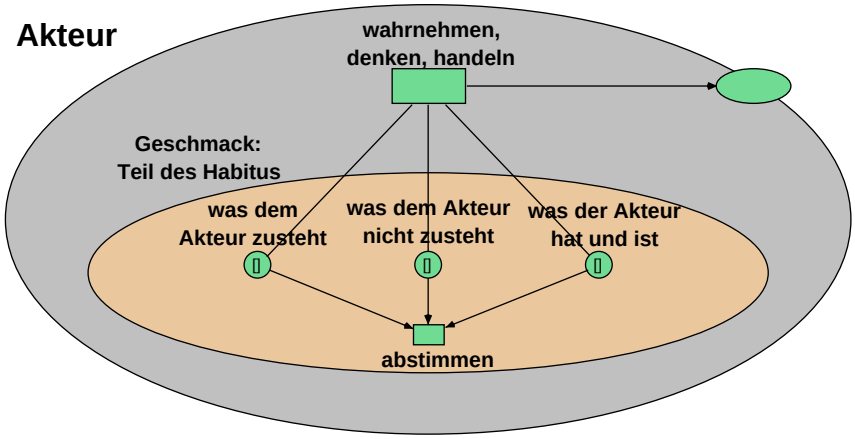


Abbildung 6.30: Geschmack – ein Teil des Habitus

In diesem Sinn wird alle soziale Praxis durch einen Sinn für Vereinbares und Unvereinbares, für Verträgliches und Unverträgliches geleitet. Und dieser Sinn ist der Geschmack. Er vereinigt – mittels Sympathie und Antipathie – die Dinge und Menschen, die durch gemeinsame soziale Prägung aufeinander abgestimmt sind und deshalb vorweg zueinander passen. Er fördert damit gesellschaftlich passende Beziehungen – Gleich und Gleich gesellt sich gern – und behindert Disharmonien.

Der Geschmack eines Akteurs sorgt dafür, dass dieser mag, was er ist und hat, und dass er das besitzt und ist (bzw. erlangt und wird), was er mag. Der Geschmack ist ein Hang zu dem, wozu man ohnehin verdammt ist, zu den Eigenschaften und Besitztümern, die einem sozial ohnehin zugeschrieben werden. Man kann also sagen, dass Akteure mittels geschmacklicher Unterscheidungen wechselseitig ihre soziale Identität konstruieren[55]. Sie bestimmen sich selbst nach konkreten Indikatoren für alles, was mit ihnen und ihrer Welt vereinbar oder unvereinbar ist.

Im Geschmack sind alle Kontrast- oder Unterscheidungsstrategien verankert, die Akteure als Kampfmittel in den symbolischen Auseinandersetzungen verwenden. So gründet etwa das positive Recht auch seinem Selbstverständnis nach in allgemein geteilten Gerechtigkeitsvorstellungen und Rechtsgefühlen. Das bedeutet: Strategien, die auf gesellschaftliche Innovation und Wandel zielen, sind nur ein Aspekt aller Unterscheidungsstrategien. Sie dienen immer dazu, einer

[55] und: sich an die Welt anpassen, wie sie nun einmal ist. Das kann durchaus resignativ stattfinden: die Trauben, die einem zu hoch hängen, mag man irgendwann nicht mehr.

bestimmten Gruppe neue Vorteile oder Vorsprünge gegenüber anderen zu verschaffen. Innovationen haben also Bourdieu zufolge keinen fest bestimmten Ort im sozialen Raum – etwa: die Arbeiterklasse, oder: die neuen sozialen Bewegungen, oder: die Internet-Generation – sie entstehen aus den Kämpfen um soziale Positionen.

Der Habitus stabilisiert sich selbst und „sein" Feld

Der Habitus erzeugt ausschließlich solche Aktionen, die beobachtbar der Logik des sozialen Feldes angepasst sind, das ihn selbst geprägt hat. Er trachtet danach, die Strukturen[56] zu produzieren, die ihn erzeugt haben. Denn die objektiven Bedingungen, die eine Habitusform prägen und die Existenz des Habitus selbst erst ermöglichen, machen den Habitus aus. Jeder Habitus wird durch eine je besondere, homogene Klasse von objektiven hervorgebracht, die ihn konditionieren – über Einschränkungen und Grenzen, die seinen Erfindungen von vornherein gesetzt sind.

Diese Selbstbezüglichkeit ist in Abb. 6.31 dargestellt. Wie durch das Netz in Abb. 6.27 dargestellt, legt die Logik des Feldes den Habitus fest, indem sie definiert, welches Kapital wertvoll ist. Diese speziellen Wechselkurse eignet sich der Akteur – mittels des Inkorationsprozesses aus Abb 6.29 – in Form des Habitus an. Diese Inkorporation bewirkt eine Voreinstellung auf die Logik des Feldes, so dass die Handlungen die Logik bestätigen.

Die habituellen Dispositionen sind den Erfordernissen der Praxis des Feldes vorangepasst, deshalb objektiv[57] mit ihnen vereinbar. Damit ist der Habitus die zur Tugend gemachte Not des Anpassens an die Gegebenheiten. Es „werden die unwahrscheinlichsten Praktiken vor jeder näheren Prüfung durch Sofortunterwerfung unter die Ordnung, die ... gern ... Abgelehntes verwirft und Unvermeidliches will, als undenkbare ausgeschieden." (Bourdieu, 1993, 100)

Und auf diese Weise legt der Habitus selbst die Zukunft fest. Er liest aus der Gegenwart die Zukunft heraus, die er erkennen kann. Weil diese „erkannte Zukunft" ihm als die einzig mögliche oder zumindest als sehr wahrscheinlich eintretende erscheint, nimmt er sie vorweg und passt sich von vornherein an sie an, indem er Handlungen und Deutungen so steuert, als träte die vorweggenommene Zukunft ein. Damit führt er diese Zukunft eigentlich erst herbei.

Denn der Habitus nimmt ein Ereignis nicht einfach wahr, weil es passiert. Ein einfacher Reiz wirkt nicht auf ihn, er muss aus diesem Reiz selbst erst einen relevanten Reiz machen. Die Akteure, in denen er inkorporiert ist, reagieren aber nur auf Reize, die zu erkennen er sie konditioniert hat. Damit nimmt der Habitus selektiv nur das wahr, was ihn eher bestärkt und bekräftigt als hinterfragt und verwandelt (vgl. Abb. 6.32). Er wählt Orte, Ereignisse, Personen des Umgangs und, vor allem, neue Informationen systematisch aus und meidet dabei die Konfrontation mit solchen Informationen, die sein akkumuliertes „Wissen" in Frage

[56] Strukturen sind im Bourdieuschen Sinne wohl am ehesten als „objektive Regelmäßigkeiten der Praxis" zu verstehen. Strukturen, Existenzbedingungen und Regelmäßigkeiten kann man hier analog verwenden.

[57] „Objektiv" benutzt Bourdieu so, dass man es mit „von einem unvoreingenommenen Beobachter aus gesehen" übersetzen kann.

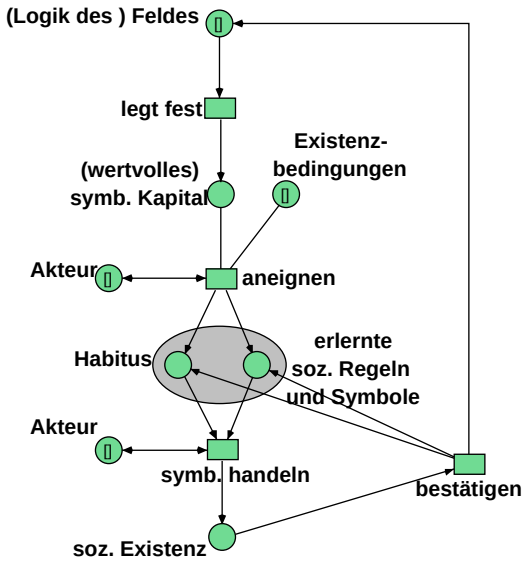


Abbildung 6.31: Die habituellen Dispositionen sind den Erfordernissen der Praxis des Feldes vorangepasst

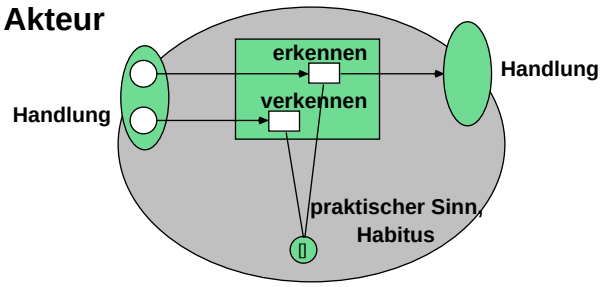


Abbildung 6.32: Selektive Wahrnehmung des Habitus

stellen könnten. Kann er diesen Informationen nicht ausweichen, verwirft er sie. Diese Vermeidungsstrategien des Habitus zeigen sich im persönlichen Verhalten als unbewusstes, unwillkürliches Vermeidungsverhalten.

Erhält ein Habitus neue Informationen, die seinem bisherigen „Wissen“ zwar nicht entsprechen, es aber auch nicht in Frage stellen, dann kann er neue Mittel zur Wahrnehmung seiner alten Funktionen erfinden.

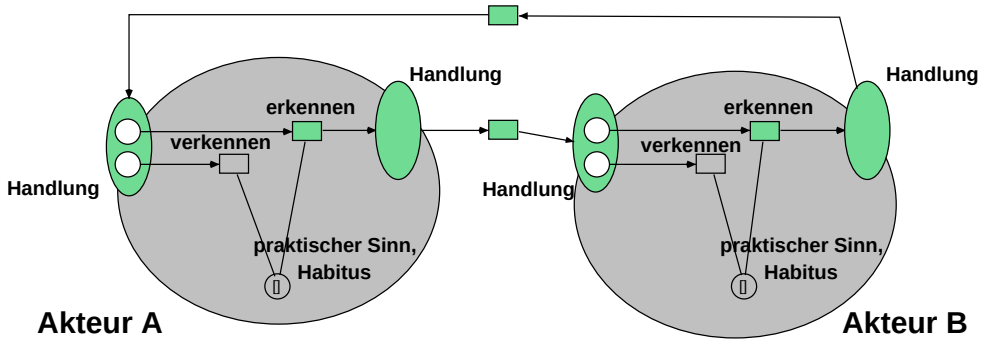


Abbildung 6.33: Der Habitus gewährleistet seine eigene Konstanz

So gewährleistet der Habitus seine eigene Konstanz; er wehrt Veränderungen ab und schützt sich vor Krisen und kritischer Befragung. Die Abbildung 6.33 illustriert dies am Beispiel zweier Akteure: Akteur A handelt im Sinne seines Habitus und Akteur B erkennt nur den Teil von A's Handlung, der zu seinem, d.h. B's Habitus eine Passung besitzt – andere Aspekte werden ausgeblendet. Der Habitus tendiert immer dazu, sich ein Milieu, eine relativ konstante Welt von Situationen zu schaffen, die seinen Erzeugnissen und Erfindungen einen möglichst aufnahmebereiten Markt bieten, und die damit seine Dispositionen verstärken. Man kann sagen, dass der Habitus frühe Ersterfahrungen zu hoch gewichtet, weil er alles, was passiert, durch ihre Brille sieht und bewertet und mit den von ihnen zur Verfügung gestellten Mitteln bearbeitet.

Der Habitus passt zu dem Feld

Es ist nun deutlich, dass das Feld nicht einfach passive Akteure dazu zwingt, sich ihm angemessen zu verhalten, sondern dass die Akteure sich den feldüblichen Habitus erst anprägen und aneignen müssen. Aber auch wenn sie aktiv an dieser Anpassung arbeiten, können sie doch nicht wählen, welchen Habitus, welches Feldes Spielregeln und distinktive Symbole sie erwerben. Genauso wenig können sie ihren Habitus einfach ablegen oder austauschen. Im Gegenteil, beim Eintritt in ein fremdes Feld, etwa durch sozialen Aufstieg oder Migration in eine andere Kultur, müssen sie in langwieriger und quälender Arbeit ihre Persönlichkeit umbauen, quasi ihre „Natur“ umwandeln, indem sie ihren (vgl. Abb. 6.34). Das gelingt ihnen niemals vollständig, und entsprechende distinktive Symbole werden ihnen zugeschrieben: „Parvenü“, „Neureicher“, „Prätendent“ bzw. „unsauberer, fauler, schmarotzender Zuzügler“. Habitus formen

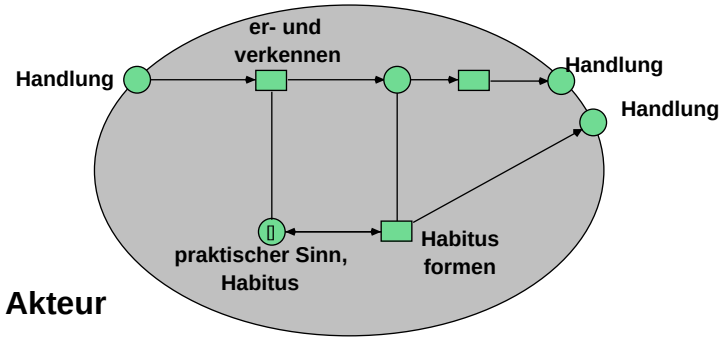


Abbildung 6.34: Anpassung des Habitus

Ein Habitus ist nur an ein Feld vorangepasst – an das, in dem er erzeugt wurde. Und auf diesen Habitus ist das Feld nun seinerseits angewiesen, denn nur er erkennt dieses Feld, seine Regeln und seine distinktiven Symbole vollständig an (vgl. Abb. 6.35).

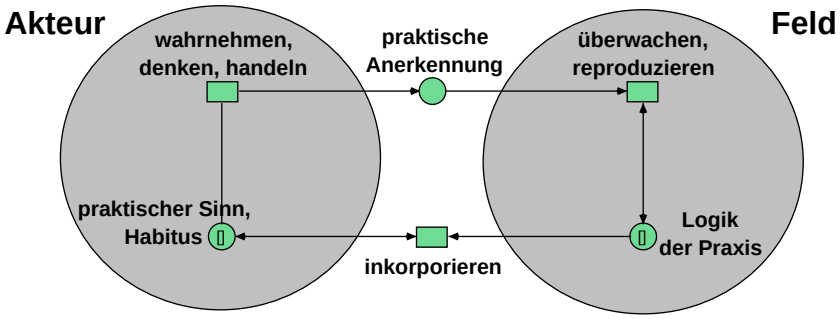


Abbildung 6.35: Der Habitus stabilisiert sein Feld (vermischte Darstellung)

So sind die habituellen Dispositionen zum Beispiel für das Funktionieren von Institutionen notwendig. „Eine Institution ... ist nur dann vollständig und richtig lebensfähig, wenn sie dauerhaft nicht nur in Dingen, also in der ... Logik eines ... Feldes objektiviert ist, sondern auch in den Leibern, also in den dauerhaften Dispositionen, die diesem Feld zugehörigen Erfordernisse anzuerkennen und zu erfüllen.“ (Bourdieu, 1993, 108).

Konkret: Erst der Habitus, der einen Bildungstitel anerkennt – der also den Gebrauch von Bildungstiteln kennt, beherrscht und akzeptiert – lässt den Bildungstitel überhaupt als wirksames Element der sozialen Praxis funktionieren. Der in institutionalisierten Bildungstiteln aufgehobene Sinn muss also ständig dem Zustand des toten Buchstabens entrissen und „zum Leben erweckt“ werden, gleichsam bewohnt werden von einem Habitus, der sich den objektivierten Titel praktisch aneignet.[58] Objektiviertes Kapital bleibt nur als solches bestehen, wenn es von Handelnden angeeignet und tatsächlich (als Waffe oder Einsatz in

[58] Jeder Habitus zwingt den Institutionen dabei Korrekturen und Wendungen auf. Das ist zugleich die Kehrseite und Voraussetzung dieser Reaktivierung.

Auseinandersetzungen) verwendet wird. Es verlangt unaufhörliche Beziehungsarbeit: ständig neue symbolische Akte der Anerkennung und Bestätigung des Feldes und seiner Symbole (vgl. Abb. 6.35).

Solche habituellen Verhaltensweisen des Alltagsverstands, die seine Symbole anerkennen, werden vom Feld deshalb auch entsprechend entlohnt. Sie gelten als „vernünftige", „sinnvolle" und „selbstverständliche", „richtige" Handlungen. „So macht man das bei uns". Es wäre gegen die Regeln, dumm oder krank, einen Bildungstitel einfach zu ignorieren. Gegen derlei Ignoranten werden die Grenzen des Feldes geschlossen.

Habitus und objektivierte Institutionen sind also darauf prädisponiert, sich entgegenzukommen; sie passen vorweg zueinander, sofern der Habitus nämlich im selben Feld inkorporiert wurde, das aus den objektiven Strukturen besteht, auf die er trifft. Diese prästabilisierte Harmonie zwischen Habitusdispositionen und Feldbedingungen bewirkt, dass wer einem Feld zugehört, praktisch bedingungslos die Werte des Feldes anerkennt – und die Willkür ihrer Setzung verkennt (vgl. Abb. 6.35). Diese Akte des gleichzeitigen Erkennens und Verkennens sind Bedingung für das Funktionieren von Feldern – und dessen Ergebnis.

Die habituellen Strategien der Praxis sind den Akteuren nicht bewusst

Die Neigung von Gruppen/Klassen zum Verharren in ihrem Sosein geht, so muss man folgern, darauf zurück, dass ihre Mitglieder dauerhafte Dispositionen aufweisen. Sie liegt folglich niedriger als etwa explizite Familienüberlieferungen, denen man bewusst die Treue halten muss, oder als bewusste Strategien oder explizite Normen.

So haben die Mitglieder derselben Gruppe (oder Klasse) schon deshalb viele Erfahrungen miteinander gemein, weil der Habitus für eine einheitliche, von den Ersterfahrungen dominierte Aufnahme von Erfahrungen sorgt. Darüber hinaus hat jedes Mitglied einer Gruppe (Klasse) „sehr viel größere Aussichten als ein Mitglied irgendeiner anderen Klasse, mit den für seine Klassengenossen häufigsten Situationen konfrontiert zu werden" (Bourdieu, 1993, 112). Und diese sich gleichenden Mitglieder finden schnell zueinander, weil sich ein Habitus im anderen erkennt, und dann werden sie sich ihrer gemeinsam geteilten Geschichte versichern und sich identische Geschichten erzählen.

Die Praktiken und die Reaktionen des Habitus werden und sind objektiv aufeinander abgestimmt und einander angepasst, ohne dass irgend eine strategische Berechnung, Planung, bewusste Bezugnahme auf eine Norm oder ausdrückliche Abstimmung dafür erforderlich wären. Man kann sogar auf direkte Interaktionen verzichten. (Damit ist nicht ausgeschlossen, dass Reaktionen des Habitus von einer strategischen Berechnung begleitet sind, die ganz bewusst diejenige Operation zu realisieren trachtet, die der Habitus auf andere Weise sowieso realisiert.) Der Habitus koordiniert die Praktiken und Strategien, die er erzeugt, weil er sie allesamt an identischen objektiven Notwendigkeiten, denen des Feldes, ausrichtet.

Auch die Unterscheidungsstrategien, wie Offizialisierung oder Geschmack, sind keine bewussten, geplanten Strategien, sondern in Gewohnheiten, Veranlagungen und Neigungen verankert, die von den Akteuren ungedacht bleiben

Abbildung 6.36: Habituelles Handeln ist nicht strategisch

(vgl. Abb. 6.36). Es handelt sich vielmehr um strategische Rituale oder rituelle Strategien.

Die Praxis ist insofern vernünftig, objektiv zweckmäßig, verstehbar und schlüssig, ohne aber Resultat eines durchdachten Plans oder rationaler Berechnung zu sein; ohne dass sie auf expliziten Zweck hin organisiert ist; ohne aus gewollter Schlüssigkeit und reiflich überlegter Entscheidung hervorgegangen zu sein (vgl. Bourdieu, 1993, 95).

6.3.3 Produktion, praktische Anerkennung und Verschleierung sozialer Ordnung

Nur durch Aneignen und Anerkennen erlangt etwas gesellschaftliche Existenz. Es ist deutlich geworden, dass das soziale Feld, in dem Akteure aufwachsen, ihnen ihre Identität verleiht. Deshalb, und weil sie Aneignungs- und Prägungsarbeit, psychische und ökonomische Ressourcen investieren, um an der kollektiven Bildung teilzuhaben und individuell symbolisches Kapital zu erwerben, entwickeln die Akteure vorweg ein Interesse am Vorhandensein und Fortbestehen „ihres“ Feldes.

Legitimitätsproduktion für bestehende Verhältnisse durch praktische Anerkennung

Mit ihrer Investition machen sie die vom Feld als wertvoll bestimmten Güter je für sich selbst erstrebens- und bewahrenswert. Allein dadurch, dass Akteure einfach handeln und erleben, spielen sie in ihrer Welt mit. Sie lassen sich durch ihre Teilnahme auf das ein, worum es im Spiel der Praxis geht. Und das bedeutet schon: Sie erkennen die Welt im Handeln – praktisch – an als die, als die sie sich ihnen darstellt.

Und das ist eine Vorweg-Legitimation der bestehenden Wirklichkeit, vor aller bewussten, gewollten und expliziten Legitimation. Es ist die praktische Anerkennung[59] des Bestehenden. Akteure leisten ungezählte Akte des unreflektiert-naiven, eingeborenen Anerkennens der Axiomatik bzw. der Gesetzmäßigkeiten

[59] Bourdieu spricht statt von praktischer Anerkennung eher vom praktischen Glauben. Anerkennung als neutralerer Begriff passt besser, da die Glaubensphänomene, um die es hier geht, nicht religiös sind. Anerkennen in diesem Sinne heißt auch „unreflektiert hinnehmen und dadurch mitbetreiben“.

des Feldes – der Wirtschaftsordnung, der Rechtsordnung, der politischen Verfassung und ihrer Institutionen, des Aufbaus des Bildungs- und Erziehungssystems, die ihrerseits allesamt institutionalisierte Formen dieser Legitimitätsproduktion sind –, die sie stillschweigend einhalten. Praktische Anerkennung ist die gegenseitige Anerkennung von Habitus und Feld (vgl. Abb. 6.35).[60]

Da symbolisches Kapital nichts weiter ist als praktisch sozial Anerkanntes, gilt es immer schon als legitim. In den Augen der Akteure ist symbolisches Kapital legitimer Besitz, der im Charakter des Besitzers begründet ist.

Folglich verschafft symbolisches Kapital Akteuren und ihren sozialen Beziehungen einen Gewinn an Legitimität. Sie können sich, so wie sie sind, im Recht, im Rahmen der Norm fühlen. Das Ausmaß an kollektiver praktischer Anerkennung, das den Akteuren in Form von symbolischem Kapital zur Verfügung steht, ist zugleich das Ausmaß der Legitimität bestehender sozialer Ordnungen samt ihrer Machtverhältnisse.

Die Akkumulation symbolischen Kapitals ist ein Mittel zur Reproduktion bestehender Verhältnisse, also auch zur Durchsetzung der Anerkennung von Macht.[61]

Alle Akteure, die den symbolischen Kampf kämpfen, anerkennen und konstituieren demzufolge indem sie kämpfen sowohl die herrschende Verteilungsstruktur (Klassenordnung) als auch ihre Grundlagen, den Wert ihrer Kultur. Insofern sind alle Kontrahenten objektiv Komplizen. Und insofern bilden die Unterscheidungsstrategien aller Klassen das Selbstbewusstsein der herrschenden Klasse.

Triebfeder und strukturelle Vorteile der herrschenden Klasse in symbolischen Auseinandersetzungen

Wer hat, dem wird gegeben: Die herrschende Klasse hat die größte Chance zur Akkumulation symbolischen Kapitals. Ihre Mitglieder können es sich nämlich in den Augen der Beherrschten legitimer Weise leisten, anerkannte Normen zu verletzen oder zu verändern.

Wer über viel Kapital verfügt, besitzt sowohl die Fähigkeit, gesellschaftlichen Anforderungen nachzukommen als auch die Autorität, sie zu ignorieren. Diese Freiheit von sozialen Zwängen wird den Herrschenden zugeschrieben und allgemein anerkannt – indem man beobachtet und hinnimmt, dass sie tatsächlich immer wieder neues symbolisches Kapital akkumulieren, sprich neue Normen,

[60] Prominente Beispiele für Verhältnisse praktischer Anerkennung, die Bourdieu nennt, sind: Charisma – das Produkt ungezählter Kreditübertragungen durch die Anerkennenden (Verkennenden), die aber nicht wissen, dass sie mittels ihres Anerkennens selbst Produzenten der charismatischen Autorität sind. (2) Konsum – der Konsument trägt durch die Arbeit des Aneignens zur Hervorbringung des von ihm konsumierten Produkts bei. (3) Der Einfluss vom Kritiker auf Leser – der existiert nur insoweit, als die Leser ihm diesen Einfluss einräumen. (Das tun sie dann, wenn sie in ihrem Gesellschaftsbild, ihrem Geschmack und ihrem ganzen Habitus strukturell mit ihm übereinstimmen.)

[61] Bourdieu spricht davon, dass die Akkumulation symbolischen Kapitals rein demonstrativ sei und nicht produktiv. Diese Auffassung hält näherer Analyse nicht stand, denn ohne die Verwendung symbolischen Kapitals brächen soziale Strukturen, deren Regelungs- und Regulierungsmomente ja gerade der Einsatz von Kapitalien ist, zusammen.

Werte, Deutungen etc. setzen. Dies führt darüber hinaus zu habituell „ungezwungenem Verhalten“, das eine „zwanglose Atmosphäre“ herstellt.[62]

Übererfüllung und bewusste Übertretung von Normen durch Mächtige geraten so zu Demonstrationen von Ungebundenheit und Zwanglosigkeit, von Natürlichkeit. Die Herrschenden können es sich nicht nur „erlauben“, geltende Normen zu übertreten und anerkannte Werte zu missachten, sondern ihre Normenübertretungen gelten als Mode und Modelle für richtiges Verhalten. Herrschende können also selbst Werte und Normen setzen.[63]

Dieses Moment an Freiheit gegenüber der eigenen Soziallage, selbst distinktives Symbol, ist das Fundament symbolischer Auseinandersetzungen.

Also sind die Herrschenden – die bereits Distinguierten und die Aspiranten auf Distinktion (Prätendenten) – die Agitatoren sozialer Kämpfe. Die Prätendenten suchen die exklusiven Merkmale der Distinguierten zu erringen, erringen sie und verringern damit deren Distinktionswert. Sich davon abgrenzend, müssen sich die Distinguierten immer neue exklusive Merkmale suchen oder konstruieren, mit denen sie sich von den Prätendenten absetzen und sich ihre Exklusivität bestätigen können. Diese Dialektik treibt die symbolischen Auseinandersetzungen an[64]; die Unterscheidungsstrategien[65] sind die Basis der Dynamik eines Feldes. Beherrschte Klassen sind in symbolischen Auseinandersetzungen lediglich defensiv, als Gegen- und Kontrastbild vertreten[66].

Herrschende machen also – als Vorbilder und Vorbildner – die Meinung und das Bild, das man sich von ihnen macht – im Gegensatz zu den Beherrschten im symbolischen Kampf, die das Fremdbild als Selbstbild an- und übernehmen. Das ist ein entscheidender Vorteil, denn die soziale Anerkennung verschafft denen Legitimation, die in der Gruppe oder Gesellschaft anerkannten distinktiven Symbole (Normen, Werte, guten Geschmack, Gesetze, legitime Kulturgüter usw.) perfekt beherrschen, offiziell vertreten und damit sichtbar besetzen und besitzen. Das fällt der herrschenden Klasse besonders leicht: Sie setzt ja die geltenden Werte und Normen!

[62] So wird es jedenfalls gesehen, unabhängig davon, als wie ungezwungen oder zwanghaft es ein unvoreingenommener Beobachter beschreiben würde. Personen, die in Radio- und Fernsehsendungen nach Partner/inne/n suchen, liefern, wenn sie ihre Wünsche formulieren, ein etwas anders gelagertes, aber anschauliches Beispiel dafür, was so alles unter dem Begriff natürlich verstanden werden kann.

[63] Offizielle Anerkennung schließt allerdings nicht nur das Recht, sondern auch die Pflicht ein, die Unterscheidung mit den offiziell verfassten und garantierten Unterscheidungsmerkmalen (Ehrenzeichen) amtlich und öffentlich herauszustellen, den zugewiesenen Rang einzunehmen, indem man die damit zusammenhängenden Attribute und Praktiken übernimmt. Das ist der Habitus sozusagen dem Feld schuldig. Und charismatische Führer verinnerlichen auch tatsächlich diesen Zwang zur erhöhten Anpassung an gesellschaftliche Normen. Sie empfinden, dass sie es sich selbst schuldig sind die Gruppe durch mustergültiges Verhalten wie durch bewusstes Einschreiten ständig an die Werte zu erinnern, die sie offiziell vertritt.

[64] Das ist übrigens eine der vielen Gedankenfiguren von Norbert Elias, die Bourdieu übernimmt.

[65] Z.B. Recht.

[66] und zwar als „gewöhnlicher“ „Pöbel“, der „populäre“ oder „populistische“ Dinge mag mit seinem „vulgären“ Geschmack und Verhalten. Die Disprivilegierten erscheinen im gesellschaftlichen Diskurs deswegen als Negativfolie, weil auch hier das Weltbild in der Farbe der Sieger gemalt wird.

Allgemein erscheint der als besonders aufrichtig und glaubwürdig, der „verkörpert“, was er sagt, der seine Aussagen durch sein gesamtes Erscheinungsbild, Verhalten und Auftreten unterstreicht. So kann nur der erscheinen, der seine „natürliche Position“ im Feld einnimmt: dessen Dispositionen voll und unmittelbar mit den Erwartungen übereinstimmen, die ‚man‘ an einen Inhaber dieser Position richtet. Er „verbiegt sich nicht“. Deshalb brauchen Distinguierte nur zu sein, was sie sind, und sie gelten als vorbildlich und glaubwürdig.

Von diesem Ausgangspunkt kann man besonders gut weiteres symbolisches Kapital akkumulieren. Diese Akkumulation beginnt mit Offizialisierung.

Der Prozess der Offizialisierung

Mächtige Gruppen streben danach, die Gesellschaftsordnung zu festigen, aus der sie ihre Macht ableiten. Dazu verwenden sie Offizialisierungsstrategien. Deren Ziel ist es, (a) Allgemeininteressen zu definieren, eigene partikulare Privatinteressen symbolisch zu solchen der Allgemeinheit zu erheben und anerkannte Allgemeininteressen symbolisch zu vereinnahmen, um (b) als selbstloser Vertreter von legitimen Allgemeininteressen zu gelten und die bestehenden sozialen Verhältnisse als legitim anerkennen zu lassen.

Zu diesem Zweck folgen Machtgruppen ihrem Hang, sich zu öffentlichen Bekenntnissen zusammen zu finden („Kapital und Kapital gesellt sich gern“). Die ökonomisch aufwändige Zurschaustellung symbolischen Kapitals zieht anderes Kapital an. Die Gründe sind: (1) Symbolisches Kapital wird denen eingeräumt, die die meisten materiellen und symbolischen Garantien bieten. (2) Symbolisches Kapital gilt auch auf dem ökonomischen Markt, wo es in Gestalt von „gutem Ruf“, „gutem Namen“ etc. Vertrauen und Kredit erwirbt. (3) Wer über hohes Sozialkapital verfügt, ist gefragt; es lohnt sich, ihn zu kennen. Beziehungen entstehen für diesen Verfügenden „von selbst“, weil die anderen ankommen. (4) Die Lebensart und Daseinsform der Machthaber wird als Grundlage von Legitimität angesehen – die Machthaber steigern ihren symbolischen Profit allein dadurch, dass sie sind, wie sie sind, weil sie dann sind, wie man zu sein hat. Dadurch erscheinen sie zwanglos, „echt“, „natürlich“, glaubwürdig. Die Bedingungen der Möglichkeit dieser Lebensart bleiben unbekannt.

Deshalb kann die Zurschaustellung symbolischen Kapitals allein schon materielle Gewinne bringen. Materielle Reichtümer können andererseits zusätzlich einen Wert als Instrumente der Machtdemonstration erlangen, indem man sie vorzeigt.

Mit öffentlichen Versammlungen und Bekenntnissen stellt sich die Macht – zu denken als Verhältnis und relative Stellung aller sozialen Gruppen/Akteure zueinander, verdichtet in distinktiven Symbolen – sichtbar zur Schau. Mit diesem öffentlichen Zur-Schau-Stellen bestätigt die Macht sich das Recht auf Sichtbarkeit (sie darf und soll sich zeigen) selbst, und sie lässt sich dieses Recht öffentlich anerkennen. Die Abbildung 6.37 stellt einen solchen Anerkennungsprozess dar: Akteur A stellt sein Symbolsystem zur Schau, was Akteur B, dessen Habitus nicht an dieses Feld angepasst ist, zwingt, seinen Habitus zu formen, d.h. sich anzupassen. Damit wird gleichzeitig auch die Macht von A anerkannt. Zugleich zieht die Macht eine strikte Grenzlinie zwischen sich und allen offiziell missbil-

ligten (okkulten, mystischen) Machtformen[67], von denen sie sich als legitime Macht abhebt.

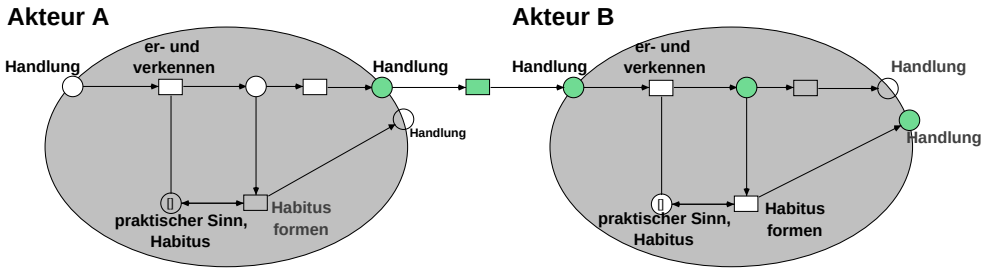


Abbildung 6.37: Zur Schau stellen der Privilegierten und Wiedererkennen der Disprivilegierten

Die mächtige Gruppe lässt Aussagen über die sozialen Verhältnisse verlauten. Damit legt sie fest, welche Weltdeutung sie als gültig veranschlagt, und mit welchen Worten und in welcher Sprache diese zu verbreiten sei. Auch diese Aussagen, Deutungen und die Sprache lässt sie öffentlich anerkennen. So macht sie die Art und Weise deutlich, auf die man über die soziale Wirklichkeit reden / denken darf. Sie definiert stillschweigend – einfach durch Sprechen, Zeigen und Zuschauen lassen – die offizielle Sprache – und damit die Grenzen zwischen dem Denkbaren und dem Undenkbaren.

Durch wiederholtes Sprechen derselben Aussagen in derselben Sprache entfaltet diese Sprache ihre magische - symbolische - Wirkung: *Nicht nur die Machtgruppe, sondern auch die disprivilegierten Gruppen erkennen sich darin wieder* (vgl. dazu die mehrstufige Netzdarstellung in Abb. 6.37). So reproduziert sich die offizielle Theorie der konkurrierenden Gruppen über sich selbst und ihre Verhältnisse. Mit der Verwendung dieser „eingeborenen“ Selbsttheorie, den „Worten des Stammes“ (Bourdieu), regieren sich die Gruppen gleichsam selbst: Sie anerkennen die aktuelle Gestalt ihrer sozialen Verhältnisse im Handeln.[68]

Auf diese Weise wird soziale Ungleichheit produziert und legitimiert. Unterschiedliche Praxisformen werden in klassifizierende soziale Schemata, kontinuierliche Verteilungen der physischen Ordnung in signifikante Gegensätze, umgewandelt. So werden aber auch die Zwangsverhältnisse, die den Einzelnen durch Verwandtschaft, Nachbarschaft oder Arbeit unvermeidlich aufgenötigt werden, durch die ehrlich gemeinte Fiktion eines uneigennützigen Tauschs in freiwillige Verhältnisse verwandelt, die auf Gegenseitigkeit beruhen.

Mit einem Wort: De-facto-Unterschiede (auch Willkür- und Ausbeutungsverhältnisse) werden zu legitimen, dauerhaften, offiziell anerkannten (vgl. dazu Abb. 6.38), als selbstverständlich und in der Natur begründet erscheinenden

[67] die erst durch diese Grenzziehung zu okkulten und mystischen Machtformen gemacht und als solche diskriminiert werden.

[68] Und deshalb gilt: Wer sich die Begriffe und Norm/Theorie einer Gruppe zu eigen macht, eignet sich die Macht an, auf die Gruppe einwirken zu können (die „Macht, welche die Gruppe mittels ihrer offiziellen Sprache über sich selbst ausübt“).

(Rang- und Wert-) Unterschieden gemacht. Am Ende scheint die Gesellschaftsstruktur aus natürlichen Unterschieden zu bestehen.

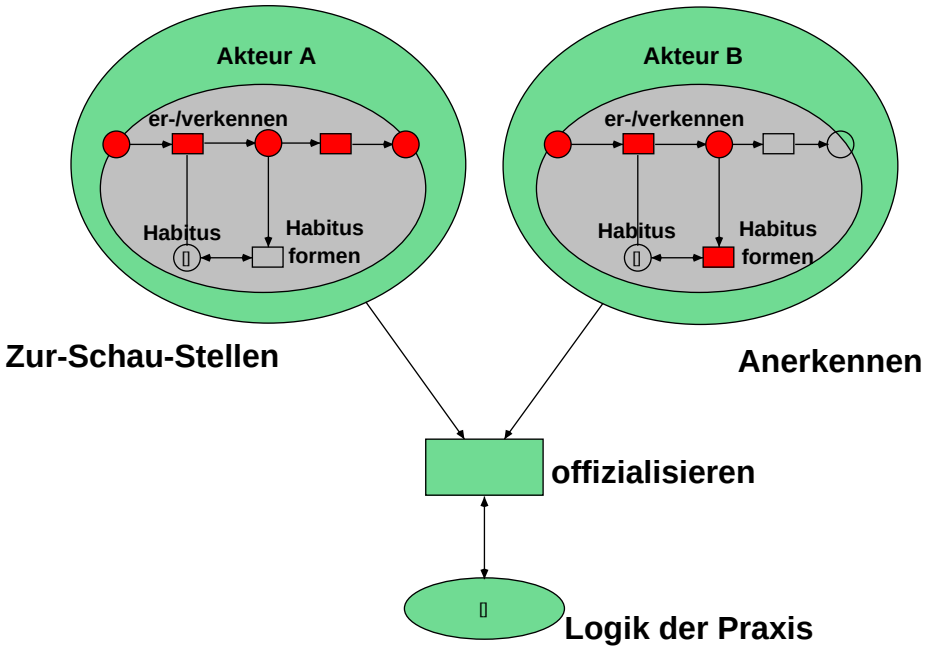


Abbildung 6.38: Offizialisieren

Die Legitimation bestehender Verhältnisse entsteht also ursprünglich aus dem Anerkennen dessen, was als offiziell und sichtbar gilt und existiert (Offizialisierung ist somit die Urform der Institutionalisierung). Die Illusion natürlicher Unterschiede beruht letztlich auf der Macht der Herrschenden, Kraft ihrer bloßen sichtbaren Existenz eine soziale Definition richtigen Lebens offiziell durchzusetzen: nämlich ihre eigene Lebensweise als die richtige, vollkommene, natürliche zu definieren.

Institutionalisierung – Reproduktion der Ordnung und der Herrschaft durch objektivierte und institutionalisierte Mechanismen

Die offiziellen Unterschiede können institutionalisiert werden. Die „richtigen“, allgemein anerkannten – weil scheinbar im Allgemeininteresse liegenden Unterscheidungsstrategien – werden von der herrschenden Klasse kodifiziert. Symbolisches Kapital wird in Form von Titeln, Namen und Posten institutionalisiert.

Diese Herrschaftsverhältnisse, die durch objektivierte und institutionalisierte Mechanismen vermittelt und der direkten Interaktion entzogen sind, sind so undurchsichtig und dauerhaft wie Sachen. Sie entziehen sich dem Zugriff des Bewusstseins und der Macht des Einzelnen. Denn Macht- und Abhängigkeitsverhältnisse bestehen nun scheinbar zwischen Titeln, Posten und Gütern, und zwischen den Mechanismen, die den gesellschaftlichen Wert und die Verteilung

von Titeln und Posten auf Individuen erzeugen und absichern.[69] Solche Mechanismen sind z.B. das Bildungssystem, der Markt und der Justizapparat. Die Besitzer der Mittel zur Beherrschung dieser Mechanismen können es sich ersparen, unmittelbar und ausdrücklich auf die Herrschaft über Menschen gerichtete Strategien zu verfolgen.

So erlangen und erhalten die herrschenden Machtgruppen das Monopol auf Institutionen, die offiziell Rangplätze festlegen und garantieren (wie Bildungstitel, Posten / Ämter und ihre Vergabe). Mit diesen institutionalisierten Unterscheidungsstrategien überwachen sie soziale Vereinigungs- und Trennungsstrukturen und regeln die Verwendung symbolischer Eigenschaften.

Die Objektivierung symbolischen Kapitals in Institutionen sichert die Reproduktion seiner Verteilungsstruktur, und damit die jeweiligen Gewinne der privilegierten Akteure. Denn sie bewirkt, (1) dass die Akteure ihre Errungenschaften nicht ständig und vollständig durch bewusstes Handeln wiedererschaffen (z.B. nachweisen) müssen; (2) dass ihre Erzeugungsgrundlage, der Kampf um symbolisches Kapital, vergessen wird, weil die Institutionen scheinbar unabhängig von Akteuren sind; (3) dass die Privilegierung durch Herkunft und Vererbung in der familiären und exklusiven Akkumulation symbolischen Kapitals aus dem öffentlichen Diskurs ausgeblendet bleibt; (4) dass die bestehende Kapitalverteilung durch die schiere Existenz von Titeln und Posten Symbolwirkung entfaltet.

Das Bildungssystem zum Beispiel garantiert eine sichtbare Beziehung zwischen Titeln und Posten, und es verschleiert die Beziehung zwischen Titeln und ererbtem kulturellem Kapital. So legitimiert es die Übertragung kulturellen Kapitals durch Vererbung.

Gleichzeitig muss kulturelles Kapital zunehmend, um auf dem Arbeitsmarkt wirksam werden zu können, durch das Bildungssystem in Form von Titelvergabe bestätigt werden: Der „offizielle“ Bildungstitel wird zunehmend zur Bedingung für das Besetzen herrschender Positionen.

Verkennen der wahren Verhältnisse

Gilt die institutionalisierte soziale Ordnung und ihre offizielle Wahrheit als so selbstverständlich, dass man sie nicht mehr benennen, geschweige denn erläutern und begründen muss, dann wird sie vergessen, d.h. niemand kann sie mehr bewusst benennen. Dann besteht sie um so gefestigter und stabiler fort, sie gerinnt zu „sozialem Beton“. Und zwar gerade deshalb, weil sie als die einzig denkbare und mögliche Einrichtung und Erklärung der Welt gilt, weil vergessen wurde, dass es eine kontingente Ordnung / Interpretation ist, deren Erzeugungsgrundlagen – interessierte, wenngleich selbst wiederum unbewusste Strategien zur Profitsteigerung im gesellschaftlichen Kampf ums Kapital – ebenfalls vergessen wurden. Die Gesellschaftsordnung ist dann zur Natur geworden, bewusster Zugriff ist nicht möglich. Die Tatsache, dass das „Natürliche“, „Selbstverständliche“ ein sozial konstruiertes, kontingentes Produkt menschlicher Geschichte ist, ist vergessen.

[69] Unschwer ist hier die Marxsche Gedankenfigur des Fetischcharakters der Ware wiederzuerkennen.

Gesellschaftliches Anerkennen heißt folglich immer zugleich (a) Erkennen und Befolgen der offiziellen Werte und Regeln eines gesellschaftlichen Feldes, und (b) Verkennen der „wahren", inoffiziellen gesellschaftlichen Verhältnisse. Akteure kennen sozusagen nur die halbe Wahrheit über ihre gesellschaftlichen Verhältnisse, sie erzeugen ständig kollektiv falsche Erkenntnisse (vgl. Abb. 6.26).[70]

Denn: (1) Akteure kennen die Voraussetzungen ihres Handelns und Bewertens nicht, diese bleiben ungedacht. Ihr Bewusstsein ist ein „Bewusstsein, das keine Ahnung davon hat, dass es das, was es erkennt, selbst hervorbringt" und dem die „Mechanismen verborgen bleiben, durch die sie zur Fortdauer der Herrschaftsverhältnisse beitragen" (Bourdieu, 1993, 243). (2) Personen täuschen sich eine Berufung zu dem vor, wozu sie ohnehin verdammt sind: sie bilden eine Schicksalsliebe („amor fati") aus. Das ist insbesondere die Wirkung ihres Geschmacks. So haben Akteure einen geschmacklichen Hang zu den Praktiken, die sie sich gemäß der ihnen verfügbaren finanziellen und symbolischen Kapitalien leisten bzw. erlauben können.

Was die Akteure nicht erkennen (verkennen), sind in erster Linie die Kontingenz und die Erzeugungsformel sozialer Praxis.

Die Kontingenz der Praxis Das ist die Tatsache, dass die soziale Ordnung eines Feldes, seine Regeln und distinktiven Symbole prinzipiell willkürlich oder kontingent sind - also die Kontingenz[71] sozialer Wirklichkeit. Damit ist die einfache Tatsache gemeint, dass die Welt nicht immer so sein muss, wie sie ist, wie man sie kennt, sondern dass sie auch anders sein könnte, verändert werden könnte. Ein soziales Feld ist und bleibt ein Artefakt, eine willkürliche soziale Konstruktion, ein künstliches Konstrukt, das auch anders hätte ausfallen können und im Prinzip jederzeit geändert werden könnte.[72] Aber:

„Das Eigentümliche an diesen [rituellen Akten] ist nämlich gerade, dass niemand sich erkühnt, sie als absurd, willkürlich oder unmotiviert zu erleben, und dass sie keinen anderen Daseinsgrund haben als den, zu existieren und sozial als existenzwürdig anerkannt zu sein. Riten als Praktiken sind sich Selbstzweck und finden schon in ihrer Ausführung ihre Erfüllung. Sie sind Akte, die man ausführt, weil ‚es sich so gehört', weil ‚das halt so gemacht wird', bisweilen aber auch, weil man schlicht nicht anders kann. Dabei braucht man nicht zu wissen, warum und für wen man sie ausführt ... oder was sie bedeuten." (Bourdieu, 1993, 39)

[70] Man kann sich das Verhältnis von verkannten zu erkannten sozialen Verhältnissen etwa so vorstellen wie das des heimlichen Lehrplans zum offiziellen Lehrplan.

[71] Bourdieu spricht statt von Kontingenz von Willkür.

[72] Die Kultur jeder sozialen Gruppe bspw., oder alle Unterscheidungen und Unterschiede der Sozialwelt – also auch soziale Ungleichheiten und die Wertzuweisungen eines Feldes – sind in diesem Sinne kontingente, zufällige Artefakte, besonders verbindliche Formen des Fetischismus. Auch die Habitualisierungen der Praxiswelt (die rituellen Praktiken) sind im Prinzip willkürlich, sie laufen nach kontingenten Regeln ab, die unbewusst verwendet werden. Das können sie auch, weil sie keinen höheren Sinn erfüllen müssen, sondern Selbstzweck sind; sie finden in ihrer Ausführung ihre Erfüllung.

Die Erzeugungsformel der Praxis Die Erzeugungsformel[73] besteht in der subjektiven, aber überindividuellen Neigung und Fähigkeit zur Aneignung eines einheitlichen Gesamtkomplexes von distinktiven Präferenzen, d. h. von verschiedenen und unterscheidenden Fähigkeiten. Sie erzeugt die Praxis in all ihren Ausprägungen.

Bezogen auf eine Gruppe oder einen Habitus heißt das, dass den Einzelakteuren nicht bewusst wird, welche Phänomene sie ihren Bezugsobjekten auswählen und wie sie das tun – wie sie also die Gruppe, ihre praktischen Verhältnisse zueinander und ihre distinktiven Symbole herstellen. Die Kriterien, nach denen bestimmte Symbole hervorgehoben und andere vernachlässigt werden, werden unbewusst im und durch das praktische Verhältnis zur Situation definiert. Daher braucht sich die Praxis auch nicht konsequent nach solchen Kriterien zu richten. Niemand kontrolliert das, weil es niemand kontrollieren kann.

Und symbolisches Kapital wird für das Gegenteil von Kapital gehalten. Es ist ja gerade die Funktion symbolischen Kapitals, dort wirksam zu sein, wo direkte Übertragungen ökonomischen Kapitals sozial missbilligt werden.

Die ganze Wahrheit der sozialen Verhältnisse wird auf diese Weise kollektiv verschleiert. Jede rituelle Praxis[74] samt ihrer offiziellen Theorie vermeidet die Frage nach ihrem Daseinsgrund, ihrer Begründung. Aus der Akteursperspektive wäre das die Frage nach dem Sinn der Welt, des Lebens oder des Daseins.

Fragen, die sich die Praxis nicht stellt, die sie vielmehr als barbarisch von sich weist, lauten: Wer hat dem scheinbar an sich Wertvollen seinen Wert zugewiesen, und warum? Welche Interessen werden in der scheinbar interesselosen, neutral-natürlichen sozialen Ordnung gefördert und durchgesetzt, wem dient diese Ordnung?

Das angeborene Regel- und Symbolsystem der Praxis (die soziale „Erstsprache“, die neugeborene Individualakteure erlernen), übergeht alles mit Schweigen, was ihr als selbstverständlich gilt, also auch die Möglichkeit, solche Hinter-Fragen zu stellen.

Akteure beantworten diese Fragen, wenn man sie ihnen stellt, mit legalistischen Alltagstheorien. Die Grundwahrheiten ihrer Primärerfahrung – die eigentliche Antwort – können sie nicht benennen; jene lässt sich nur aus Ausgelassenem, Weggelassenem und Verschwiegenem ableiten.

Erkenntnis der Erzeugungsformel

Die kollektive Verkennung sozialer Verhältnisse ist also institutionell organisiert und garantiert. Und das ist auch nötig, denn die kollektive Bildung symbolischen Kapitals kann nur gelingen, wenn unerkannt bleibt, wie die Logik des Feldes funktioniert. Bleibt als letzte Frage, wie es möglich ist, diesen gesellschaftlichen Verschleierungszusammenhang zu zerreißen.

[73] Der Begriff „Erzeugungsformel“ erinnert stark an Luhmanns „Kontingenzformel“. Beide Begriffe bezeichnen eine notwendige „letzte Ursache“ aktueller Formen von Praxis / Kommunikation, die invisibilisiert ist. Hier fallen die Gemeinsamkeiten selbst dieser scheinbar so unterschiedlichen Theorien ins Auge.

[74] Unter ritueller Praxis versteht Bourdieu Routinen, Gewohnheiten, alle Handlungs-, Denk- und Wahrnehmensformen, die man unbewusst und automatisch verwendet.

Unter welchen Bedingungen können soziale Akteure aber dennoch die Erzeugungsformel ihrer Praxis erkennen?

(1) Generell setzt ein Nachdenken über das eigene Handeln, ein Bewusstwerden über die wirklichen Verhältnisse nur in Ausnahmefällen, in Grenzsituationen und Krisenzeiten ein: nämlich wenn die Automatismen des Handelns (Routinen, rituelle Praktiken und habituelle Verhaltensweisen) versagen, wenn der praktische Sinn an einem auftauchenden Problem scheitert.

In diesem Fall stellen Akteure explizite Verhaltensgrundsätze, Urteilskriterien und Wahrnehmungsregeln auf, bewusst stellen sie Berechnungen an und ziehen daraus Schlussfolgerungen. Das tun sie allerdings nur so lange, bis sie ein praktikables Ergebnis erreicht haben.

(2) Akteure können sich aber auch entscheiden, das unreflektierte Einverständnis mit ihrem Feld, die Zustimmung zu seinen Verhältnissen und Gegebenheiten zurückzunehmen und stattdessen genau diese Verhältnisse und Gegebenheiten nachdrücklich zu formulieren. Dann löst sich die Erkenntnis der Wirklichkeit sozialer Beziehungen von der Anerkennung dieser Beziehungen[75]. Die Zurücknahme des zustimmenden Einverständnisses zum Bestehenden ist zugleich Voraussetzung für eine Bewusstwerdung und Produkt einer Bewusstwerdung. Und für Bourdieus Theorie.

6.4 Heinrich Popitz: Ordnung und Investitionswert[76]

Der Abschnitt 6.4.1 gibt einen detaillierten Einblick die Modellierungsschritte und Zwischenergebnisse, die sich zu Beginn der Modellierung der Theorie sozialer Ordnungsbildung von Heinrich Popitz erzeugt wurden. Abschnitt 6.4.2 behandelt Verhaltensregelmäßigkeiten, Abschnitt 6.4.3 die Modellierung ordnungsbewusster Akteure und Abschnitt 6.4.4 deren Verortung in einem Akteurmodell. Der Text schließt mit einem Fazit über die Funktionalität petrinetzbasierter Theoriedarstellungen für die Konstruktion und Rekonstruktion soziologischer Theorien.

6.4.1 Konstruktion sozialer Ordnung: Verhaltensregelmäßigkeiten

„Akteure erzeugen Verhaltensregelmäßigkeiten, indem sie sich in ihrem Verhalten jeweils neu festlegen und auf ihr Verhalten festgelegt werden bzw. andere Akteure auf das Verhalten festlegen. (Solche Festlegungen können in zahlreichen Variationen getroffen werden). Soziales Verhalten kann nur durch solches Sich-gegenseitig-Feststellen auf Dauer gestellt werden.“ Diese Theoreme lassen sich in zwei Netzen modellieren. Im ersten (dargestellt in Abb. 6.39) wird die Festlegung von Verhalten modelliert.

Die Plätze „Akteure“ und „Verhalten“ fungieren als Vorbedingungen der Transition „festlegen“, sie müssen also „besetzt“ sein, damit ein Festlegen überhaupt

[75] Die Schicksalsliebe kann dabei in Schicksalshass umschlagen.

[76] Dieser Abschnitt basiert auf der gemeinsamen Arbeit mit meinem Kollegen Roman Langer und stellt eine Überarbeitung von (Köhler u. a., 2003b) dar. Das Textmanuskript stammt dabei von Roman Langer, auf dessen Basis von Michael Köhler die Modelle entwickelt wurden.

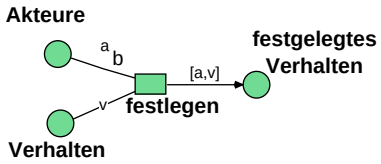


Abbildung 6.39: Akteur b legt Akteur a auf Verhalten v fest

stattfinden kann. Die Variablen a und b stehen für zwei Akteure, die von dem Platz „Akteure“ abgezogen werden, b wird hier als der aktive Akteur – derjenige, der etwas festlegt – interpretiert. b und a können identisch sein. Schaltet die Transition „festlegen“, dann wird ein Paar „Akteur und Verhalten“ $[a, v]$ auf dem Platz „festgelegtes Verhalten“ abgelegt.

Dieses Netz wird nun ergänzt, um den Aspekt der Dauerhaftigkeit des Verhaltens einzubeziehen (Abb. 6.40)

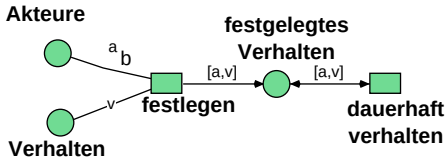


Abbildung 6.40: Festlegen kann Verhalten dauerhaft machen

Bereits bei der Modellierung dieser Sätze wurde ein implizites Theorem deutlich. Popitz geht davon aus, dass es Akteure gibt, und dass diese sich verhalten. Wir explizieren dieses so grundlegende wie einfache Theorem ebenfalls in Form zweier Plätze.

Der soziologische Text fährt fort: „Verhaltensregelmäßigkeit $=_{df.}$ Sozial als gleichartig definiertes Verhalten wiederholt sich in sozial als gleichartig definierten Situationen. Was als „gleichartig“ gilt, entscheiden die Akteure in ihrer gesellschaftlichen Praxis; sie fassen Verhaltensabläufe, die sich wiederholen, und die Situationen, in denen sie sich wiederholen, als gleichartig auf. Die Konstruktion sozialer Verhaltensregelmäßigkeiten bedeutet also eine *Gleichsetzung* von Verhaltensabläufen in *gleich gesetzten* Situationen. Solche Gleichsetzungen beruhen auf Abstraktionen, auf der Heraustrennung bestimmter Merkmale aus einem Kontinuum von Umständen und Aktionen.“

Hier ist zunächst einmal festzuhalten, dass Verhalten in Situationen erfolgt. Wir fügen einen Platz „Situationen“ hinzu und, der Vollständigkeit halber, einen Platz „beobachtbares Verhalten“, die das vorläufige Ergebnis des Festlegungsprozesses ausdrückt (vgl. Abb. 6.41).

Der nächste Modellierungsschritt nimmt das „als gleichartig auffassen“ bzw. die „Gleichsetzung“ auf, und zwar in Form der Transition „als regelmäßig verstehen“, die als Vorbedingung wiederum des Platzes „Akteure“ bedarf. Schaltet die Transition, entsteht eine Verhaltensregelmäßigkeit und wird auf dem entsprechenden Platz abgelegt.

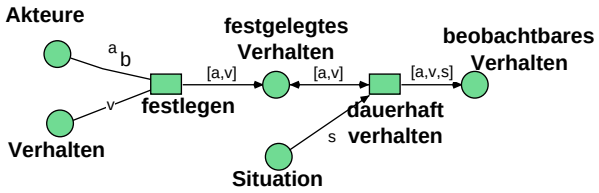


Abbildung 6.41: Situatives Verhalten

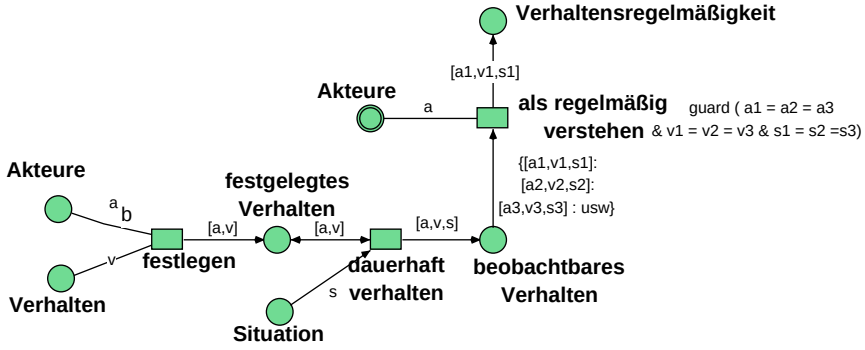


Abbildung 6.42: Verstehen als Gleichsetzen

Abbildung 6.42 erweitert die vorangegangenen Abbildungen um ein wichtiges Konzept: aus dem beobachtbaren Verhalten (Platz unten rechts) kann eine Menge von Tripeln aus Akteur, Verhalten und Situation (z.B. [a1,v1,s1]) abgezogen werden, falls diese die Bedingung (*guard*) der Transition als regelmäßig verstehen rechts oben erfüllt. Die Bedingung besagt, dass Akteure, Verhalten und Situationen jeweils als gleichartig oder regelmäßig verstanden werden können – im Sinne einer Äquivalenzrelation. Diese Transition ist an Akteure gekoppelt, weshalb als Nebenbedingung der Platz Akteure auftritt. Diese ist identisch zum Platz gleichen Namens ganz links in der Abbildung und nur aus Layoutgründen als Kopie (doppelt) eingezeichnet. Dieser Sachverhalt ist an der doppelten Umrandung des Platzes ersichtlich, das dahinter stehende technische Konzept nennt sich *virtueller Platz*.

Solcherart als regelmäßig verstandenes Verhalten bildet eine Verhaltensregelmäßigkeit.

Hier ist ein kleines Beispiel für die Explikationsleistung der Modellierung. Die Netze zeigen explizit, wenngleich vorläufig, das Verhältnis von „dauerhaftem Verhalten“, „festgelegtem Verhalten“ und „Verhaltensregelmäßigkeit“:[77] Die Festlegung der Verhaltens erfolgt zu Beginn, erzeugt Dauerhaftigkeit des Verhaltens, das dann als gleichartiges gedeutet und damit zur Verhaltensregelmäßigkeit wird. Dies hatte Popitz nicht so explizit als Prozess dargestellt.

Weiter im Text: „Verhaltensregelmäßigkeiten stellen für die Akteure Selbstver-

[77] Den Satz: „Ein Akteur versteht diese Regelmäßigkeiten, wenn er versteht, worauf es in einer Situation sozial ankommt.“ modellierten wir vorerst nicht.

ständlichkeiten dar, die sie von einer Menge Verhaltensentscheidungen entlasten. Die Entscheidung *für* das Verhalten ist irgendwann früher getroffen worden und wird nun nicht mehr bewusst reflektiert. Verhaltensregelmäßigkeiten sind zugleich Unterlassungsregelmäßigkeiten."

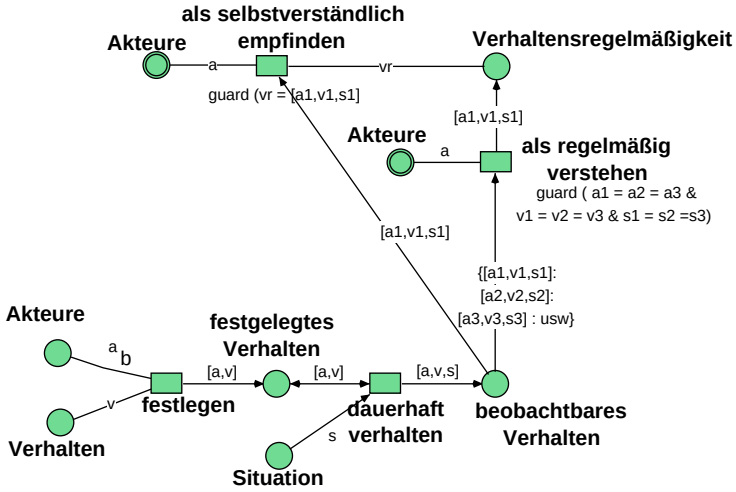


Abbildung 6.43: Verhaltensregelmäßigkeiten als Selbstverständlichkeit

Hier wird zunächst die Transition „als selbstverständlich empfinden" hinzu gefügt. In Abbildung 6.43 ist das Konzept der virtuellen Plätze ein weiteres Mal eingesetzt worden. Es bietet sich insbesondere bei der Erweiterung bestehender Netze an, wenn unnötige Kanten quer durch die Netzabbildung und insbesondere unübersichtliche Kreuzungen vermieden werden sollen. Die Aussage der vorhergehenden Abbildung wird das Konzept des als selbstverständlich empfinden erweitert, mit dem Akteure beobachtbares Verhalten mit Verhaltenregelmäßigkeiten abgleichen. Der Abgleich findet wiederum über einen sog. Guard statt.

Klar ist, dass wir hier quantifizieren müssen:[78] Denn etwas als selbstverständlich zu empfinden entlastet von Verhaltensentscheidungen – und das bedeutet, die Akteure müssen sich nicht *neu festlegen*, sondern bleiben festgelegt auf ihr Verhalten, und das bestätigt oder *verstärkt* das festgelegte Verhalten. Diese Rückkopplung wird in Abb. 6.44 mit einer doppelten Kante symbolisiert, die von der Transition „als selbstverständlich empfinden" zum Platz „festgelegtes Verhalten" führt. Eine Verstärkung impliziert aber eine gewisse Form der Quantifizierung, hier als Wert w. (Abb. 6.44). Die Transition als selbstverständlich

[78] Popitz selbst gibt uns gewissermaßen die Erlaubnis, Quantifizierungen dort zu modellieren, wo der Text selbst es nahe legt: „Die theoretischen Diskussionen der Soziologie stecken voller Unterstellungen über quantitative Strukturen der Normgeltung, ohne dass es auffällt, dass ihre Argumente auf etwas so Trivialem wie quantitativen Annahmen über etwas so Feines wie soziale Normen beruhen. Es hat also durchaus einen Effekt, bestimmte Fragestellungen in einer quantitativ präzisen Form zu stellen, auch wenn dabei nicht mehr herauskommen sollte als die Aufforderung zur Reflexion und Präzisierung unreflektierter Annahmen." (Popitz, 1981, 37)

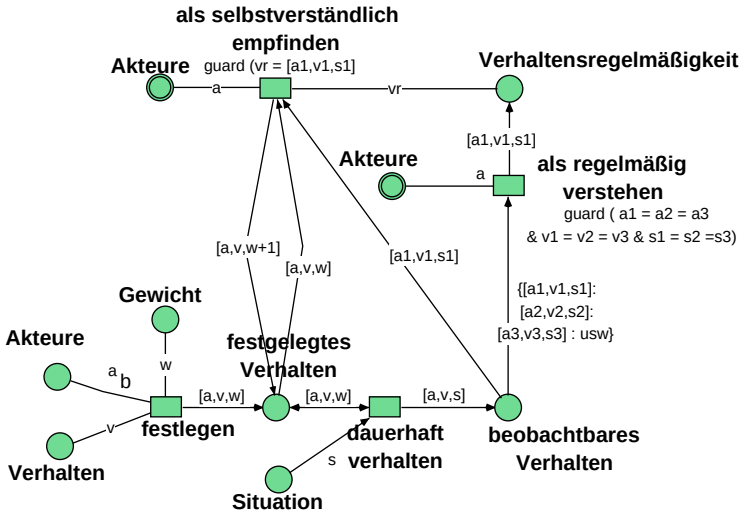


Abbildung 6.44: Verhaltensregelmäßigkeit als Selbstfestlegung

empfinden (oben Mitte in Abb. 6.44) ist zusammenfassend wie folgt zu deuten: Beobachtbares Verhalten (dargestellt als ein Tripel [a1,v1,s1] aus Akteur, Verhalten und Situation), das mit einer Verhaltensregelmäßigkeit (vr) übereinstimmt (guard vr=[a1,v1,s1]), führt dazu, dass ein entsprechendes festgelegtes Verhalten (unten Mitte) abgezogen ([a,v,w]) und mit einem erhöhten Wert für die Wichtung der Festlegung zurückgelegt wird ([a,v,w+1]). Die Interpretation des Grades der Festlegung als ganze Zahl ist dabei willkürlich.

6.4.2 Notwendige Orientierung an Verhaltensregelmäßigkeiten

Für die nun folgenden Modellierungsschritte ist es sinnvoll, einen Teil des Netzes aus Abbildung 6.44 zu übernehmen, denn der Text spricht weiterhin von Verhalten. Wir vergröbern deshalb die das regelmäßige Verhalten betreffende Netzstelle (dargestellt als Kasten in Abb. 6.45) zur Transition „regelmäßig verhalten“ (vgl. Abb. 6.46).

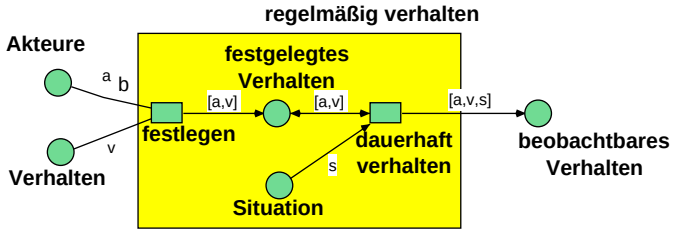


Abbildung 6.45: Verhalten als Vergröberung

Weiter im Text: „Akteure beziehen sich aufeinander, indem sie ihr Verhalten und Deuten in Rücksicht auf das vergangene, gegenwärtige und zukünftige Ver-

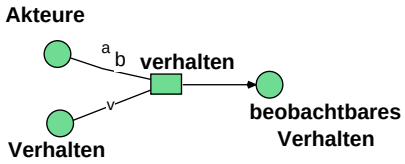


Abbildung 6.46: Vergröberung

halten anderer gestalten“ (modelliert durch die Stelle „Verhaltenserwartungen“ in Abb. 6.47).

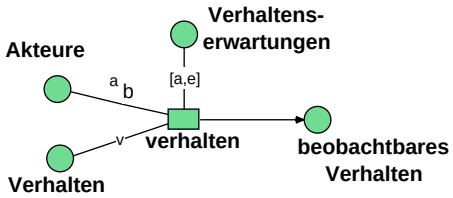


Abbildung 6.47: Akteure beziehen sich aufeinander

„Sie orientieren sich im alltäglichen Leben am Verhalten anderer, vor allem am erwarteten zukünftigen Verhalten anderer, das sie mittels Vermutungen und Hypothesen voraussehen und eben erwarten“ (voraussetzen) (vgl. Abb. 6.48). „Das zu tun ist notwendig, um sich überhaupt intensiver (als nur oberflächlich-situativ) vergesellschaften zu können.“

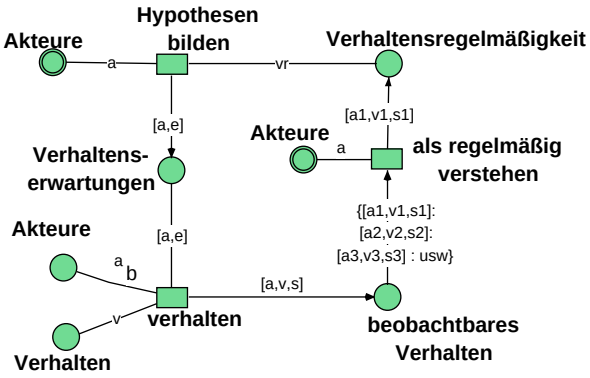


Abbildung 6.48: Hypothesen

„Verhaltenserwartung ist das Rechnen mit Verhaltensregelmäßigkeiten. Je regelmäßiger bestimmte Handlungsweisen auftreten, desto voraussehbarer sind sie, desto sicherer treffen die Erwartungen zu, die sich auf diese Handlungsweisen beziehen. Akteure machen ihr Verhalten voraussehbar bzw. erwartbar, indem sie es ‚verregelmäßigen‘“ (Abb. 6.49).

Hier zeigt sich, dass Modellierungen theoretische Bezüge aufklären, d.h. deut-

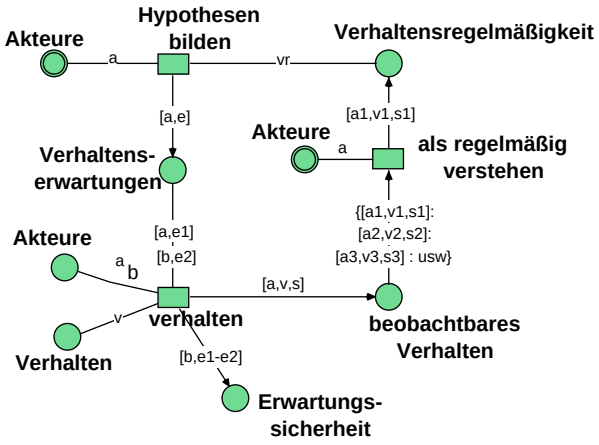


Abbildung 6.49: Erwartungssicherheit

licher vor Augen führen können. Vergleicht man das Netz in Abbildung 6.49 (Erwartungssicherheit) mit dem aus Abbildung 6.44 (Verhaltensregelmäßigkeit als Selbstfestlegung), dann wird klar, dass wir dieselbe Struktur vor Augen haben. „Als selbstverständlich empfinden“ steht an derselben strukturellen Position wie „Hypothesen bilden“, und der Platz „Verhaltenserwartungen“ könnte gut auch im Netz aus Abb. 6.44 stehen. Unten liegen die Plätze „Erwartungssicherheit“ bzw. „Situation“, die intuitivsoziologisch einen starken Bezug haben dürften: Bekannte oder klar geordnete Situationen sind durch hohe, unbekannte oder chaotische Situationen durch geringe Erwartungssicherheit gekennzeichnet. Die weitere Analyse würde nun systematisch nach Zusammenhängen zwischen Situationen und Erwartungssicherheit fragen – und wenn sie keine findet, hat sie eine Theorielücke entdeckt.

Im nächsten Modellierungsschritt wenden wir uns nun den Erwartungen näher zu. „Die Orientierung eines Akteurs“, heißt es im soziologischen Text, „beruht auf seiner Voraussicht von Verhaltensregelmäßigkeiten. Zutreffende Voraussicht ergibt gute Orientierung – Ordnungssicherheit.“ Wir sprechen im folgenden von Orientierungssicherheit, weil dieser Begriff stärker zwischen Akteur und Ordnung vermittelt – ein Akteur orientiert sich an und in seiner Ordnung – und zudem ein Verhalten beschreibt.

Indirekt wird hier der Sachverhalt ausgedrückt, dass erwartetes Verhalten (kurz: Erwartung) unterschiedlich gut mit eintretendem tatsächlichen Verhalten (kurz: Verhalten) übereinstimmen können und dass der Grad dieser Übereinstimmung feststellbar ist. Dies ist durch die obere Transition in Abb. 6.50 modelliert und wird zum Ankerpunkt der Modellierung von Orientierungssicherheit (OS).

Die beiden Transitionen in der Mitte von Abb. 6.50 drücken die Steigerung $(os + 1)$ und Minderung $(os - 1)$ von Orientierungssicherheit bei zutreffenden bzw. nicht zutreffenden Erwartungen aus. Sie stellen damit die extremen Pole der Übereinstimmungsskala dar, und der positive Pol im rechten Teil des Net-

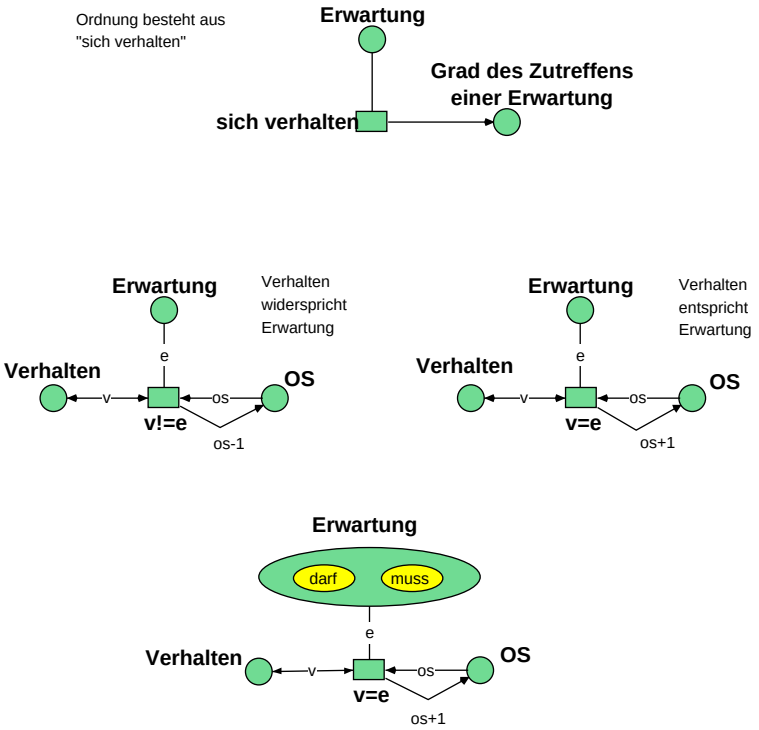


Abbildung 6.50: Orientierungssicherheit

zes (Verhalten entspricht Erwartung) ist die kurze, aber direkte[79] Fassung der Textstelle: „Ordnungssicher sind Akteure, wenn sie sicher wissen, was nicht passieren wird, aber vor allem, was sie und was andere tun dürfen und tun müssen; wenn sie eine Gewissheit entwickeln können, dass sich alle Beteiligten mit einiger Verlässlichkeit auch wirklich so verhalten, wie es von ihnen erwartet wird; wenn sie damit rechnen können, dass Übertretungen in der Regel bestraft werden; wenn sie voraussehen können, was man tun muss, um Vorteile zu erringen, Anerkennung zu finden. Man muss mit einem Wort wissen, woran man ist.“ Erwartungen teilen sich dabei (mindestens) in die Bereiche darf und kann auf (untere Transition).

Das Theorem „Akteure haben Erwartungen an das Verhältnis von Erwartung und Verhalten“ fungiert in Popitz' Ausarbeitungen als implizite Annahme; vielleicht schien sie zu selbstverständlich oder zu trivial, um sie aufzuschreiben. Da es sich aber um eine grundlegende Annahme handelt, die beinahe den Charakter eines Axioms hat, halten wir es für überaus sinnvoll, sie auch darzustellen. Augenfällig ist sie jedenfalls: Ganz offensichtlich prüfen die Popitzschen Akteure, ob aufretendes Verhalten den existierenden Normen, also Erwartungen, entspricht, oder ob es von ihnen differiert. Hier also liefert die Modellierung eine Explikationsleistung über eine theoretisch zentrale Hintergrundannahme.

An dieser Stelle ergab die Modellierungsdiskussion außerdem die Konsequenz, heuristische Synonymisierungen vorzunehmen. Die Begriffe „Vorausse-

[79] Und abstrakte! Die Textstelle wird aber im folgenden minutiös ausmodelliert.

hen“, „Rechnen mit“ und „Wissen“ und „Erwarten“ werden hier als Varianten von „Erwarten“ gleich gesetzt, ebenso gelten „Tun“, „Übertreten“ und „Bestrafen“ als Verhaltensvarianten. Hier würde eine weitere Modellierung es erforderlich machen, zum einen Listen der Verwendungsweisen dieser Begriffe anzulegen und auf Gemeinsamkeiten zu analysieren, zum anderen die Positionen dieser Begriffe in den entstehenden Netzen auf Gleichheiten zu prüfen.

Ein weiteres implizites Theorem lautet, dass Akteure die Erwartungen anderer Akteure kennen bzw. erwarten.[80] Abb. 6.51 expliziert diese Annahme und dient als Grundlage der restlichen Netze der Abbildung, die es nun erlauben, den zitierten Text genauer zu modellieren. Im folgenden wird also die Explikation der Varianten einer vermutlich identischen Struktur durchgeführt, um feststellen zu können, ob sie nicht doch strukturelle Unterschiede aufweisen.

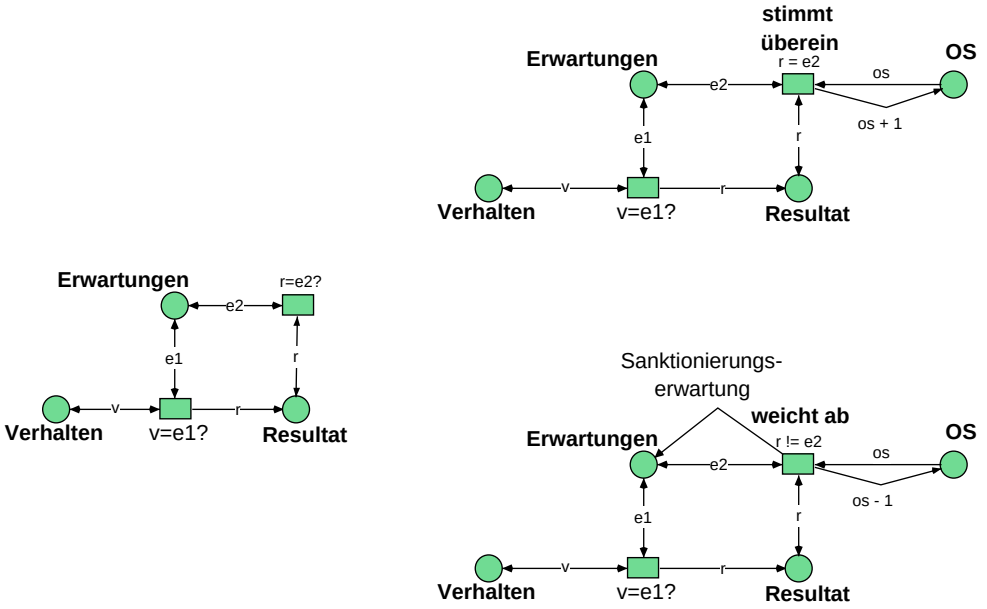


Abbildung 6.51: Meta-Erwartung: Erwartung an Erwartung an Verhalten

Abbildung 6.51 führt im oberen Netz die wiederum implizit vorausgesetzte Erkenntnis ein, dass Akteure die Erwartungen anderer Akteure kennen – genauer: erwarten. Akteure besitzen demnach nicht nur Erwartungen an Verhalten (an anderere und sich selbst), sondern auch *Meta-Erwartungen* über das Zutreffen ihrer Erwartungen (Erwartungen an Erwartungen an Verhalten usw.) und Erwartungen an auf die Resultate des Zutreffens von Verhalten und dazugehöriger Erwartung abgestimmtes Verhalten usf.

Das Teilnetz links in Abbildung 6.51 zeigt den Abgleich zwischen Verhalten und Erwartung (Transition `v=e1?` unten Mitte, vgl. Abb. 6.50 oberes Teilnetz), und wie das als Ergebnis des Vergleichs entstehende Resultat einem weiteren Vergleich unterzogen wird (Transition `r = e2?`). Daraus abgeleitet werden die beiden Fälle der Übereinstimmung (rechts oben) und der Abweichung (rechts

[80] Vgl. Luhmanns Begriff der „Erwartungserwartungen“.

unten). „Ordnungssicher sind Akteure, [...] wenn sie eine Gewissheit entwickeln können, dass sich alle Beteiligten [...] so verhalten, wie es von ihnen erwartet wird [...]“. Der so beschriebene Fall wird im oberen rechten Netz so modelliert, dass ein den („Meta“-)Erwartungen entsprechendes Resultat eines Abgleichs zwischen Verhalten und Erwartung (an dieses Verhalten) zu einer Zunahme an Orientierungssicherheit führt. Die Orientierungssicherheit wird dabei vereinfachend als Zahlenwert gedeutet, wobei ein hoher Wert gute Orientierungssicherheit bedeutet.

Des Weiteren müssen Akteure damit rechnen können, dass Abweichungen von ihren Meta-Erwartungen (Resultat des Abgleichs zwischen Verhalten und entsprechender Erwartung entspricht den Erwartungen) geahndet werden. Dieser Sachverhalt wird durch das untere rechte Teilnetz der Abbildung 6.51 ausgedrückt: Ein nicht der Erwartung entsprechendes Resultat (Transition weicht ab: $r \neq e2$) vermindert die Orientierungssicherheit und fügt den Erwartungen eine Sanktionierungserwartung hinzu, also eine Erwartung an zukünftiges Verhalten, das die Ahndung der festgestellten Abweichung umsetzt.

Es ist bemerkenswert, dass mit diesen Modellen erstmals ein Zyklus von den Erwartungen über das Verhalten zurück auf die Erwartungen geschlossen wird. Das Wissen um eine Ahndung abweichenden Verhaltens wird modelliert, indem festgestellte Abweichungen zu sogenannten Sanktionierungserwartungen führen, die neu zu den Erwartungen hinzugefügt werden. Es handelt sich hierbei um eine Faltung des Prozesses, dass Erwartungen neue, in die Zukunft wirkende Erwartungen produzieren, diese aber direkt in den Ablauf rückgekoppelt werden.

Eine weitere Wirkung auf die Orientierungssicherheit geht von der Erlangung von Anerkennung und Vorteilen aus: „Ordnungssicher sind Akteure [...], wenn sie voraussehen können, was man tun muss, um Vorteile zu erringen, Anerkennung zu finden.“ Abbildung 6.52 zeigt eine direkte Umsetzung dieses Sachverhaltes: Zu einem Verhalten gibt es Erwartungen darüber, ob dieses Anerkennung steigert bzw. Vorteile ergibt. Dieser Effekt ist beobachtbar und kann mit der Erwartung verglichen werden. Je nach Üereinstimmung ergibt sich eine Steigerung oder Verminderung der Orientierungssicherheit.

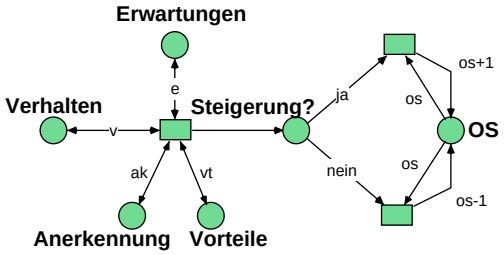


Abbildung 6.52: Anerkennungssteigerung wirkt auf Orientierungssicherheit

Eng mit den Aussagen zu Abbildung 6.52 hängt die Erkenntnis zusammen, dass Erwartungen direkt aus dem Verhalten resultieren.[81] Soll ein Verhalten Auswirkungen auf die Zukunft haben, so ist dieses in unserem augenblicklichen

[81] Diese Aussage ist einmal mehr nur indirekt dem Text zu entnehmen.

Begrifflichkeitskanon nur als zusätzliche Erwartung(en) (in diesem Fall an das Verhalten anderer: Anerkennung zollen usw.) zu sehen. Das (u.a.) von Erwartungen gesteuerte Verhalten (linke Doppelkante in der Abbildung 6.53) kann auch direkt neue Erwartungen zur Folge haben (rechte Kante).

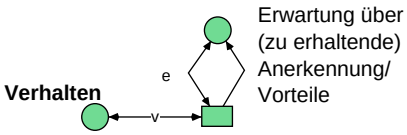


Abbildung 6.53: Verhalten erzeugt Erwartungen

„Akteure dürfen im alltäglichen Handeln nicht mit den Erwartungen anderer, d.h. mit der Voraussehbarkeit ihres eigenen Verhaltens, spielen." Aus dieser Aussage lässt sich indirekt ableiten, dass gesellschaftlich angepasstes Verhalten zur Steigerung der Orientierungssicherheit beitragen muss. Ein solches Verhalten besteht aus Verhaltensregelmäßigkeiten (vgl. Abb. 6.42 und 6.43).

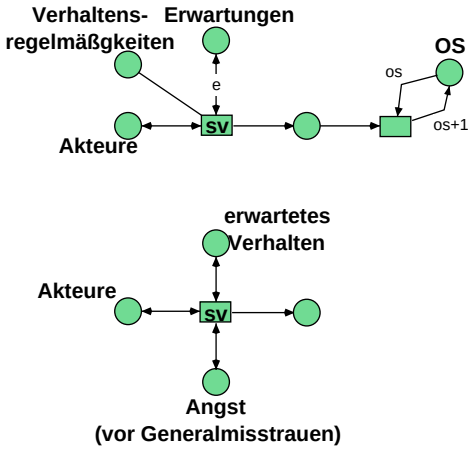


Abbildung 6.54: Verbot des Orientierungsdiebstahls

Abbildung 6.54 zeigt mit dem oberen Netz diesen Sachverhalt: Wählt ein Akteur (u.a. gesteuert von seinen Erwartungen) ausschließlich aus dem Bereich der Verhaltensregelmäßigkeiten (statt aus dem Bereich beliebigen Verhaltens), so führt dieses automatisch zu einer Steigerung der Orientierungssicherheit. Im weiteren kann man dem Akteur unterstellen, entsprechende Erwartungen zu haben und sich – so er eine Steigerung wünscht (erwartet) – dieser Erwartung entsprechend, also gewissermaßen durch diese Erwartung gesteuert, zu verhalten.

Die Gleichsetzung von erwartetem Verhalten zu Verhaltensregelmäßigkeiten geht nicht zwingend aus dem Text hervor, weshalb das untere Netz der Abbildung den Text direkt umsetzt: Angst (vor Generalmisstrauen) führt bei Akteuren zum Sich-verhalten (s.v.) ausschließlich nach erwartetem Verhalten.

Es wird zunehmend deutlich, dass wir ein Theoriestück vor uns haben, das im Kern den Zusammenhang von Erwartungsstrukturen und Verhaltensregelmäßig-

keiten – oder kürzer von Erwartung und Verhalten – behandelt. Und auch der weitere Text bestätigt dies; er behandelt subjektive Einschätzungen bzw. Erwartungen: Orientierungssicherheit (= Ordnungssicherheit) und Realisierungsgewissheit.

6.4.3 Reflexive ordnungsbewusste Akteure

Der Ordnungswert (der Orientierungssicherheit) entsteht nach Popitz aus einer subjektiven Einschätzung der Akteure. An seiner Entstehung bzw. Veränderung sind also (mindestens) die Akteure direkt beteiligt. Akteure werden auch bei ihrer Verhaltensauswahl von ihrer Orientierungssicherheit beeinflusst: „Wer zu sicher ist, verhält sich wie ein Draufgänger; wer unsicher ist, neigt zum beobachtenden Stillhalten“ umschreibt die Extreme. Abbildung 6.55 zeigt die Entstehung der Orientierungsgewissheit als Hypothese über die Orientierungssicherheit („[...] die Sicherheit, mit der sie glauben zu wissen, [...] was zu tun und zu lassen ist.“).

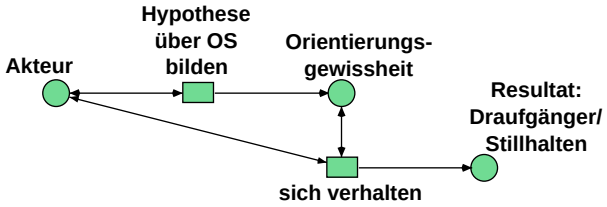


Abbildung 6.55: Orientierungsicherheit wirkt auf Verhalten

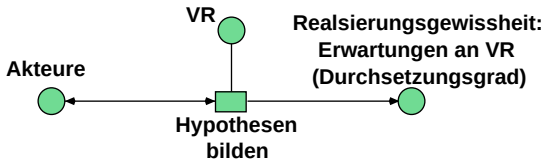


Abbildung 6.56: Wissen, was angesagt ist

Abbildung 6.56 beschreibt den Sachverhalt, dass Akteure selber einschätzen, was „angesagt ist“, d.h. in wie weit Verhaltensregelmäßigkeiten durchgesetzt sind. Die Akteure bilden Hypothesen über den Durchsetzungsgrad von Verhaltensregelmäßigkeiten bzw. den Geltungsgrad von Normen. Diese Hypothesen bilden die Realisierungsgewissheit.

Die Realisierungsgewissheit ist wieder als Erwartung an den Abgleich zwischen Erwartung und Verhalten beschreibbar und lässt sich damit in die bisherigen Modelle integrieren. Wir haben hier also einen neuen Weg der Entstehung von Erwartungen: Hypothesenbildung.

Im allgemeinen führt die in Abbildung 6.56 dargestellte Hypothesenbildung zu einer Überschätzung der Normgeltung. „Normalerweise wird die tatsächliche

Normgeltung überschätzt, was zum Verzicht auf Vorteile abweichenden Verhaltens führt.“ Eine hohe Normgeltung (= Realisierungsgewissheit) führt also zu angepasstem Verhalten. Ein Akteur wählt unter dem Einfluss einer hohen Realisierungsgewissheit statt aus allgemeinem Verhalten nur aus dem Bereich der Verhaltensregelmäßigkeiten. Diese *Übergeneralisierung* zieht eine zu hohe Realisierungsgewissheit nach sich.

Im umgekehrten Fall folgt, dass ein Bekanntwerden der Nichtbefolgung von Verhaltensregelmäßigkeiten zu einer Abnahme der Realisierungsgewissheit führt. Eine niedrige Realisierungsgewissheit hilft nicht bei der Einschränkung des Verhalten-Auswahlraumes – trotzdem ist es sinnvoll, die Realisierungsgewissheit als Wirkkomponente bei der Verhaltensauswahl beizubehalten, da der Grad der Einwirkung vom qualitativen (Zahlen-) Wert der Gewissheit abhängt.

Popitz formuliert dies nicht explizt, aber es handelt sich hierbei um einen (selbstverstärkenden) Kreislauf: Verhaltensregelmäßigkeiten werden nicht befolgt → Realisierungsgewißheit nimmt ab → Verhaltensregelmäßigkeiten werden noch weniger befolgt usw.

Die Annahme dieses selbststabilisierenden Zirkels, die wir hier identifizieren, ist ebenfalls nicht im zu Grunde gelegten soziologischen Text – und nicht in den Originalen von Popitz selbst – direkt formuliert. Wiederum aber behandeln sie das Wechselverhältnis von Erwartungen (Gewissheiten, Bekanntheiten) und Verhalten, dieses mal unter dem Gesichtspunkt, was passiert, wenn sich die Erwartungen ändern oder ihr „Härtegrad“, die Gewissheit, sinkt oder steigt.

6.4.4 Exkurs: Verortung von Erwartungen

Wir brechen an dieser Stelle die Schilderung der einzelnen Modellierungsschritte ab und werden zum Abschluss einmal zeigen, dass eine die Theorie reflektierende Modellierung auch zu Ergänzungsvorschlägen führen kann.

Das bisher modellierte Textstück enthält Hinweise darauf, dass Erwartungen (Gewissheiten) subjektiv, also bei Akteuren angesiedelt sind. Basierend auf dem formalen Konzept der „Netze in Netzen“ haben wir einen vorläufigen Vorschlag entwickelt, wie dieser Sachverhalt modellierbar ist.

In Anlehnung an die Steuerung des Verhaltens nach Popitz zeigt Abbildung 6.57 eine Sichtweise, die Erwartungen und mögliches Verhalten dem jeweiligen Akteur zuschreibt. Akteure sind hier Objektnetze innerhalb des Platzes Akteure, das Systemnetz beschreibt bislang nur das *sich verhalten*.

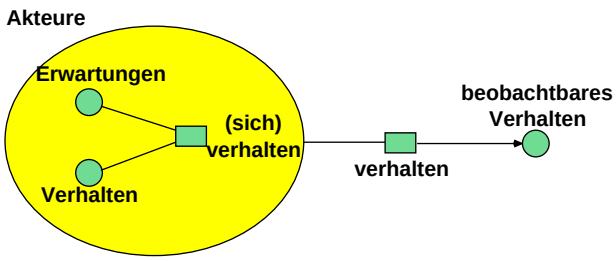


Abbildung 6.57: Erwartungen eines Akteurs bestimmen Verhalten

Erwartungen und mögliches Verhalten eines Akteurs zusammen beeinflussen die Transition (sich) verhalten an der Schnittstelle zwischen dem Akteur und seiner Umwelt. Die Transition synchronisiert sich mit der Transition verhalten des umgebenden Systemnetzes. Ergebnis dieser Synchronisation ist beobachtbares Verhalten. Vergleiche hierzu auch Abbildung 6.47.

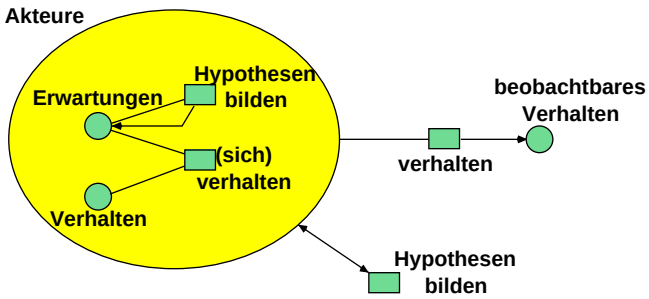


Abbildung 6.58: Hypothesen bilden neue Erwartungen

Dieses Beispiel lässt sich leicht um andere Aspekte der „offiziellen“ Popitznetze erweitern. Abbildung 6.58 fügt dem Szenario noch das Bilden von Hypothesen als neue Schnittstelle hinzu (vgl. dazu Abb. 6.48).

6.5 Mehrebenenmodell der Mikro/Makro-Verbindung

Im folgenden versuchen wir die Gemeinsamkeiten der bislang präsentierten Modelle herauszuarbeiten. Dazu wird es nötig sein, die verschiedenen Beschreibungsebenen des Modells klarer herauszuarbeiten, um sie anschließend in einem gemeinsamen Modell zu integrieren. Es Ergebnis erhalten wir ein Mehrebenenmodell, das die Mikro/Makro-Verbindungen klarer nachzeichnet, indem es die Dualität von Handlungs- und Prozessstrukturen klarer herausstellt.

6.5.1 Trennung der Modellebenen

Für die vertikale Strukturierung ist es notwendig, eine analytische Trennung von Begriffen und Konzepten vorzunehmen, die auf mehreren Abstraktionsebene verwendet werden. Sie sind somit zwar zusammenhängend, aber doch zu unterscheiden.

Für die Beziehung von Habitus und Feld aus Abbildung 6.35 ist dazu eine Trennung von Akteur und Feld vorzunehmen, da diese auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen arbeiten. Die Reproduktion des Feldes ist ein Vorgang, der auf darunter liegender Ebene durch das habituelle Handeln erzeugt wird. Die dadurch beschrieben Hierarchie von sozialen Prozessen ist in Abb. 6.59 modelliert. Analoges gilt für die Beschreibung des Offizialisierens.

Die Modellierung beruht dabei auf dem Prinzip der *Netze in Netzen*. Das Feld bildet die Modellebene, in der die Reproduktion stattfindet. Die Akteure tragen diesen Prozess, sie sind daher als Marken des Feldnetzes dargestellt. Die innere Struktur der Akteure – beispielsweise ihr Habitus – ist auf der Ebene des

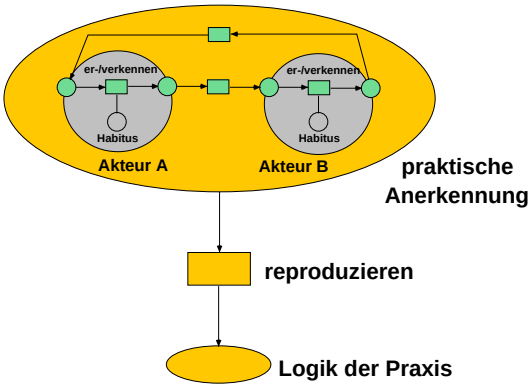


Abbildung 6.59: Der Habitus stabilisiert sein Feld (vgl. Abb. 6.35)

Feldes nicht zu sehen, da sich die Struktur des Akteurs nicht auf der gleichen Abstraktionsebene befindet wie das Feld selbst. Der Akteur kann jedoch wiederum als Netz dargestellt werden – wie für die Akteure A und B in Abb. 6.59 –, so dass seine Struktur Gegenstand des Modells ist, jedoch auf einer tieferliegenden Ebene.

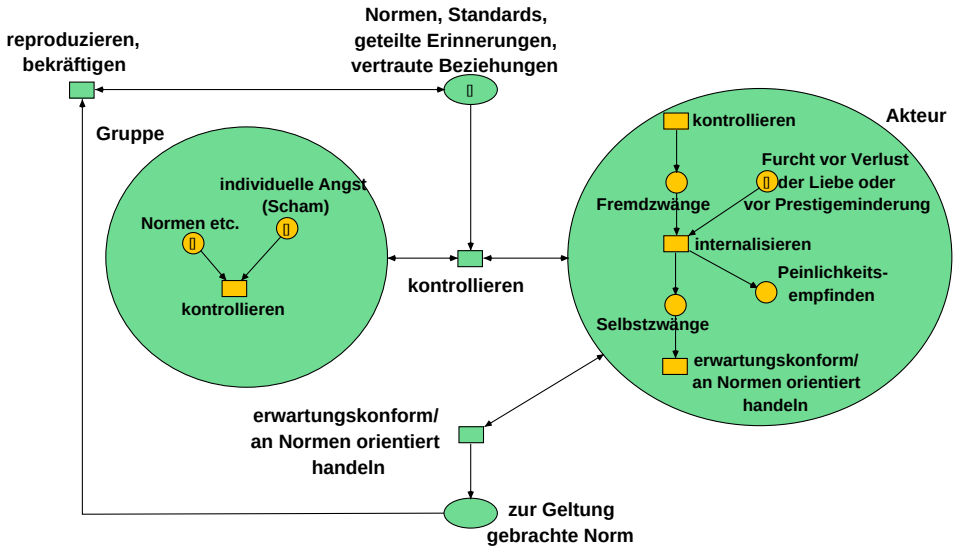


Abbildung 6.60: Trennung der Modellebenen (vgl. Abb. 6.13)

In gleicher Art und Weise ergeben sich für die Verhaltensnormierung aus Abb. 6.13 zwei Hierarchien: Die Reproduktion der Normen ist ein Prozess, der auf tieferliegender Ebene durch den Prozess der Kontrolle und der Internalisierung der Akteure erzeugt wird. Dies wird in Abb. 6.60 dargestellt. Wieder sind die Akteure als Netzmarken dargestellt. Der innere Aufbau – d.h. die Ängste des Akteurs oder sein Über-Ich – sind auf der tieferliegenden Ebene der Netzmarken dargestellt, die in das Netz, in dem der Reproduktionsprozess stattfindet, eingebettet sind.

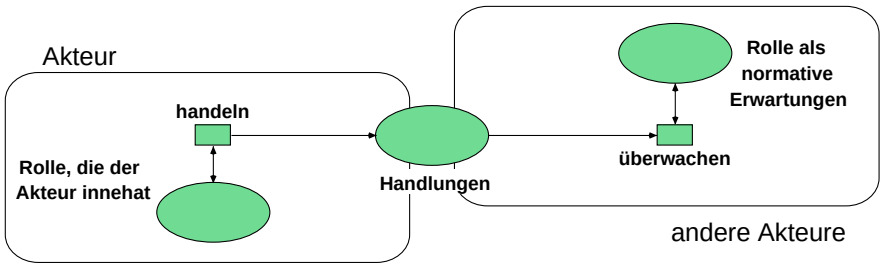


Abbildung 6.61: Kombination aus der Rolle und der Überwachung der Rollenerwartungen durch andere

Analoges gilt für die Beschreibung des normorientierten Akteurs und seiner Verbindung zum Rollenkonzept aus Abb. 5.14: Die Trennung, die hier vorzunehmen ist, besteht aus dem Gegensatz von der internalisierten Rolle und der Rolle, die als Erwartungshaltung an den Akteur herangetragen wird (vgl. Abb. 6.61).

6.5.2 Ein vereinheitlichtes Mikro/Makro-Modell

In der Gesellschaftstheorie existieren zwei Strömungen, die lehren, wie soziale Prozesse zu erklären sind. Die strukturalistische Sichtweise geht von der Makroebene aus, beschreibt also Großstrukturen wie es Gesellschaften sind. Die Individuen und ihr Handeln werden dabei als erzwungen oder induziert angenommen – Individuen werden als relativ passive Objekte der sozialen Prozesse behandelt. Die interaktionistische Sichtweise postuliert hingegen, dass die soziologische Beschreibung von der Mikroebene auszugehen habe. Die Akteure sind die zentralen Beschreibungsgegenstände, ihr Handeln erzeugt die Struktur, in der sie agieren.[82]

Giddens (1984) stellt fest, dass jede Sichtweise für sich allein genommen unzureichend ist, da schließlich beide Ansätze ihre Erklärungsberechtigung besitzen und daher nicht einzusehen ist, warum eine allein ausreichen sollte. Beide Sichtweisen sind nicht entkoppelt, sondern vielmehr in ihrer wechselseitigen Erzeugung eng verzahnt.

Es geht dabei zum einen um die Wahrnehmung struktureller Gegebenheiten durch die Akteure, zum anderen um die Einwirkung der Akteure auf die Struktur. Beide Perspektiven sind Bestandteil eines umfassenden Gesamtmodells. Die Perspektiven existieren nicht mehr lose nebeneinander her, sondern sind als speizielle Sichten auf das Gesamtmodell integriert. Das im folgende entwickelte Modell, hat somit die Aufgabe, alle Relationen und Dynamiken, die durch die zuvor entwickelten Modelle beschrieben werden, zusammenzuführen. Wir greifen hierfür auf unsere Arbeiten zum Theorievergleich (Analyse auf Gemeinsamkeiten) zurück, der die inhaltlichen Übereinstimmungen herausgearbeitet hat und nun den Ausgangspunkt für die Integration bildet. Das Modell richtet sein Interesse

[82] Man beachte die Parallelen zu gängigen UML-Modellierungstechniken (Rumbaugh u. a., 1999) beim Software-Entwurf, wie z.B. Klassendiagrammen als Strukturansicht oder Sequenzdiagramme als Interaktionssicht.

insbesondere auf die Mikro/Makro-Nahtstellen, die sich in drei Beziehungspaaren äußern. Die Paare bilden ein wechselseitiges Konstitutionsverhältnis:

1. Gesellschaft und Individuum, d.h. Akteur
2. Akteur und Handlung
3. Handlung und (Sozial-)Struktur

Bei diesen Paaren handelt es sich um dialektische Paare, die nicht nur im Rahmen der Sozionik, sondern auch für die Soziologie selbst Beachtung finden. Eine abstrakte Darstellung dieser drei Elemente, sowie ihr wechselseitiges Zusammenspiel ist in Abb. 6.62 übersichtshaft dargestellt – eine detailierte Erklärung ist Gegenstand des folgenden Abschnitts. Das Modell ist nicht nur ein Schaubild, es ist vielmehr ausführbar, d.h. die beschriebenen Prozesse können in der Simulation durch das RENEW-Werzeug Renew (1998–2009) beobachtet werden. Das dargestellte Modell besitzt die Besonderheit, dass mehrere soziale Kontexte erlaubt sind, die sich auch überlappen, da einzelne Akteure in mehreren Kontexten gleichzeitig agieren.

Das Mikro/Makro-Modell kann darüber hinaus als auch abstraktes Grundmodell einer Sozialtheorie verstanden werden. Seine Elemente sind die Makro-, die Meso- und die Mikroebene, dargestellt durch die soziale Struktur, die sozialen Prozesse und die Akteure. Die Mesoebene ist dabei durch Netze, die Marken der Makroebene sind, dargestellt, die Mikroebene analog als Marken der Mesoebene. Die einander wechselseitigen Konstitutionsverhältnisse sind durch synchrone Kanäle modelliert.

Das Mikro/Makro-Modell besitzt eine Verbindung zu der Beschreibung bei Esser (Esser, 1993, 94-98). Die Einbindung von Akteuren in die Struktur wird bei Esser durch die *Logik der Situation* beschrieben; die Handlungsauswahl des Akteurs durch die *Logik der Selektion*; die Auswirkungen der Handlungen auf die soziale Struktur als *Logik der Aggregation*.

Jede der drei Perspektiven bzw. der Logiken ist eigenständiger Gegenstand von Abb. 6.62. Die drei Logiken stehen darüber hinaus in einer Korrespondenz zu den dualistischen Begriffspaaren: Die Relation von Struktur und Akteur entspricht der Logik der Situation, die Relation von Akteur und Handlung entspricht der Logik der Selektion und die Relation von Handlung und Struktur entspricht der Logik der Aggregation. Betrachten wir im folgenden die drei Sichten aus Abb. 6.62 im Detail.

6.5.3 Dialektik von Handlung und Struktur

Die abstrakteste Sicht wird durch die grundlegende Beschreibung der Dialektik von Struktur und Handlung und ihrer wechselseitigen Beeinflussung und Bedingtheit dargestellt. Diese Sichtweise, die die Wechselseitigkeit in den Vordergrund stellt, findet sich insbesondere in den Gesellschaftstheorien wieder. In der Organisationsforschung dagegen ist zumeist nur eine der Perspektiven vorherrschend, d.h. entweder wird Organisation als gegebene Struktur verstanden, in die sich die Akteure anpassen, oder aber die Konstitution der Organisation

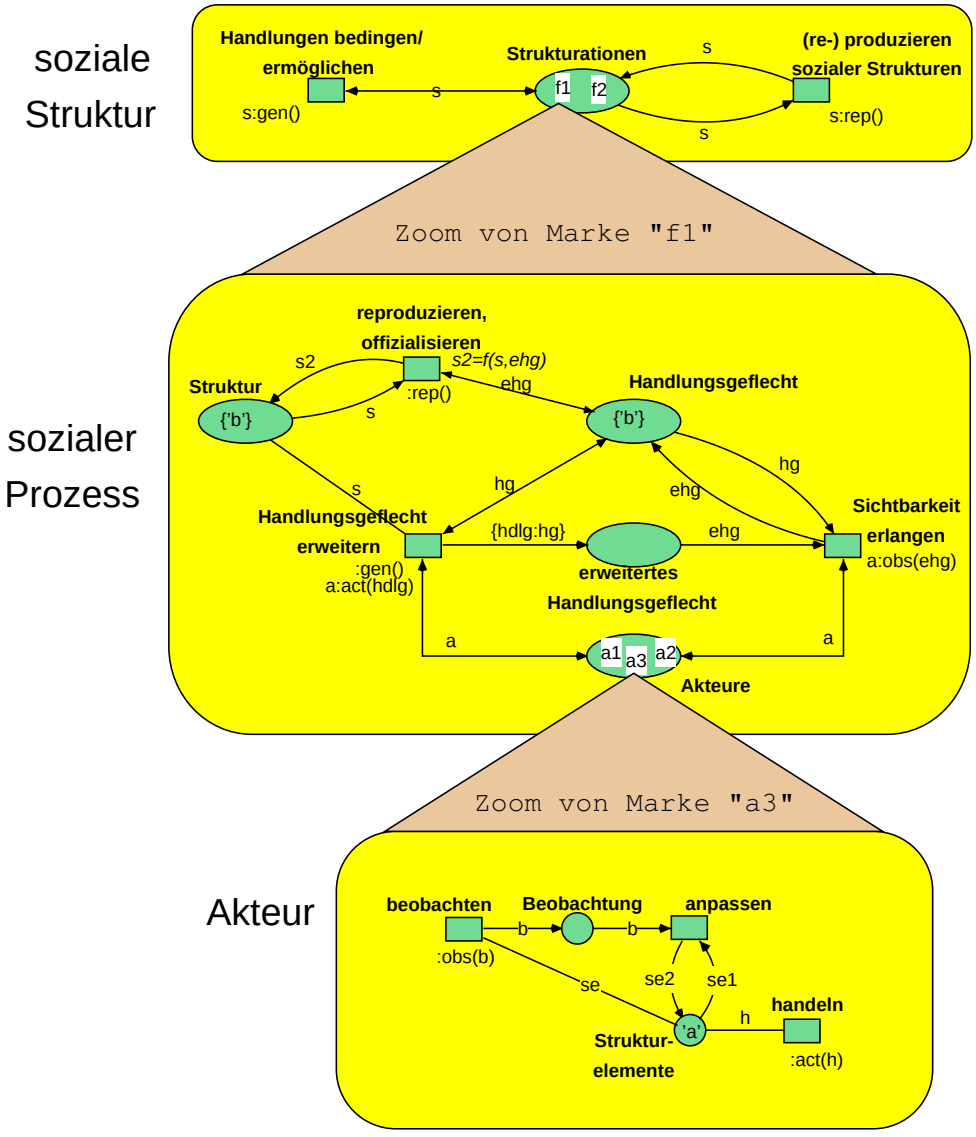


Abbildung 6.62: Abstraktes Modell einer Sozialtheorie

als Ergebnis sozialer Interaktionen wird in den Vordergrund gestellt. Eine solche einseitige Darstellung wird jedoch dem Erklärungsgegenstand zumeist nicht gerecht. Aus diesem Grund bildet die Dialektik von Struktur und Handlung die erste Modellebene.

Obwohl die wechselseitige Bedingtheit von Handlung und Struktur in sozialen Prozessen zentrales Element der Gesellschaftstheorie ist, wird die Dialektik an sich nicht direkt thematisiert. Bei Bourdieu erscheint sie als Gegensatz von Habitus und Feld, bei Elias als Wechselspiel von Norm und inkorporierter Norm. Die Erzeugung des einen ist dabei sowohl ermöglichende Bedingung als auch Folge des anderen. Aus dieser Beschreibung wird deutlich, dass sich die Dialektik auf der Ebene der Prozesse wiederfindet, aber nicht als eigentlicher Theoriegegenstand betrachtet wird.

Ein prominenter Soziologe, der die Dialektik als solche benennt und als Theorieelement in den Vordergrund stellt, ist Anthony Giddens. Er postuliert, dass die Trennung von Struktur und Handlung nur analytisch ist. Er schreibt: „Strukturen selbst existieren gar nicht als eigenständige Phänomene räumlicher und zeitlicher Natur, sondern nur in Form von Handlungen oder Praktiken menschlicher Individuen“ (Giddens, 1997, 270). Diese Beschreibungsebene ist in Abb. 6.63 dargestellt: Eine Handlung bewirkt eine (Re-)produktion der Strukturationen; ebenso bringen die Strukturationen auch Handlungen hervor.

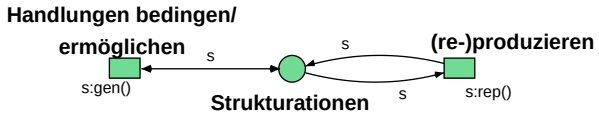


Abbildung 6.63: Abstrakter Dualismus von Handlung und Struktur

Giddens beschreibt Struktur „durch Regeln und Ressourcen, die in rekursiver Weise in die Reproduktion sozialer Systeme einbezogen sind“ (Giddens, 1997, 432). Ressourcen sind dabei Mittel, mit denen sich Austausch- und Machtverhältnisse realisieren. Giddens liefert mit diesem Strukturbegriff, der sich auf der Konzept der „Regel“ stützt, eine zentrale Anforderung an ein sozionisches Agentensystem. Giddens beschreibt den Dualismus von Struktur und Handlung – im Rahmen eines Theoriegerüstes – in drei Kategorien: Signifikation und Kommunikation, Herrschaft und Macht sowie Legitimation und Sanktion. Akteure kommunizieren, indem sie sich über interpretative Schemata auf strukturelle Formen der Signifikation beziehen. Sie sanktionieren, indem sie ihr Verhalten anhand von Normen ausrichten, die einen reflexiven Bezug auf strukturelle Formen der Legitimation besitzen, und sie üben Macht aus, indem sie sich auf Ressourcen beziehen, die in Form von Machtmitteln in die Interaktion eingehen können.

Auf der Seite der Organisationstheorie widmen sich Crozier und Friedberg der Dialektik von Handlung und Struktur (siehe dazu Kapitel 5.4) Den strategischen Ansatz der Organisationsanalyse zeichnet aus, dass er explizit eine Verknüpfung verschiedener Perspektiven (der strategischen und der systemischen) anstrebt. Crozier und Friedberg sprechen von Wechselwirkungen zwischen dem

handelnden Akteur und dem organisationalen System, sprich ihrer wechselseitigen Konstitution. Diese Sichtweise verliert jedoch an Prägnanz, wenn man der Frage nachgeht, worin genau der Zusammenhang besteht und wie er sich konkret im strategischen Ansatz ausdrückt. Hier erweist sich die Gesellschaftstheorie als wesentlich ausgearbeiteter.

Für das Garbage Can Modell (siehe v. Lüde u. a., 2003, Kapitel 2) ist anzumerken, dass ein wechselseitiges Konstitutionsverhältnis nicht angenommen wird, da im Gegenteil die Strukturen, in den Entscheidungsgelegenheiten und Entscheidungen erzeugt werden und aufeinandertreffen können, statisch sind und daher gerade nicht durch Handlungen konstituiert werden müssen.

Verlässt man die Ebene der reinen Dialektik, so gelangt man auf die Ebene der Prozesse, in denen sich die Dialektik ausdrückt.

6.5.4 Prozesse eines sozialen Feldes

Die von uns behandelten Gesellschaftstheorien von Elias, Bourdieu und Popitz scheinen auf den ersten Blick schon allein aufgrund der von ihnen verwendeten Terminologie unvergleichbar zu sein. Unsere Reanalyse zeigt jedoch, dass sich in allen Theorien einander ähnelnde Prozesse und Gegenstände wiederfinden lassen.

Zunächst ist festzustellen, dass alle Theorien von einer Prozesssicht ausgehen, in der sich die Handlungen und die Sozialstrukturen gegenseitig reproduzieren, im allgemeinen sogar identisch reproduzieren. Strukturelemente, die prozessieren, sind bei allen Theorien zum einen auf der Akteursseite, zum anderen auf der Gesellschaftsseite angesiedelt. Zwischen diesen beiden Seiten finden dann Austauschprozesse statt.

Betrachten wir zunächst die Gemeinsamkeiten in den Theorien von Elias und Bourdieu, da sich hier die augenfälligsten Übereinstimmungen zeigen.

Elias geht von Akteuren aus, die Angst vor Liebesentzug bzw. Prestigeverlust besitzen. Diese Angst bewirkt eine Anpassung an die soziale Kontrolle, indem die Fremdzwänge in Form von Selbstzwängen internalisiert werden. Diese Selbstkontrolle bewirkt somit normkonformes Verhalten, was durch Bestätigung der Gruppe die Ängste der Akteure mindert. Auf der Akteurseite stehen also Ängste und Selbstkontrolle in der prozesshaften Wechselseitigkeit.

Auch bei Bourdieu findet sich diese Gedankenfigur. Zentrales Element der Theorie ist das symbolische Kapital, speziell für den Akteur: das inkorporierte Kapital, der Habitus. Der Habitus ist das universelle Wahrnehmungs-, Denk- und Handlungsschema der Akteure. Dies entspricht den inkorporierten Selbstzwängen bei Elias. Der Ursprung dieses Inkorporationsprozesses wird jedoch nicht wie bei Elias in der individuellen Angst der Akteure gesehen, sondern primär als Prägungsprozess des Elternhauses. In beiden Fällen ist die Reproduktion sozialer Struktur Ergebnis unterbewusster Prozesse.

Auf der Strukturseite finden sich bei Elias die Konzepte der Gruppe, der Zugehörigkeit, der Norm usw. Bourdieu fasst dies alles unter der Sammelkategorie des Kapitals zusammen. Kapital untergliedert sich in soziales Kapital, das in seiner Verwendung der Zugehörigkeit zu einer Gruppe gleichkommt, und kultu-

relles Kapital, das grob der Gruppennorm entspricht. Distinktive Symbole bei Bourdieu finden sich bei Elias im Kontext von Abgrenzungsprozessen wieder.

Elias beschreibt die Reproduktion von Normen und Zusammengehörigkeit als Prozess der Kontrolle und normkonformen Handlungen der Akteure. Kontrolle versteht Elias dabei sowohl nach innen, d.h. in der gegenseitigen Beobachtung und – positiven wie negativen – Sanktionierung der Gruppenmitglieder, als auch nach außen, d.h. in der Abwehr von Fremden durch fortschreitende Distinktion. Das Mittel zu sozialer Unterscheidung und zum Machterhalt ist die strenge Regelung des Verhaltens. Sozialitäten bilden eine „Gruppenmeinung", also eine Öffentlichkeit aus, in der die Werte aller Mitglieder durch die Mitglieder selbst ständig aktuell kommuniziert werden. Diese Werte werden danach bemessen, inwieweit eine Person dem folgt, was die Angehörigen des Machtzentrums ihrer Sozialität als richtiges/falsches Verhalten definieren. Normen-Kontrolleure aber sind alle Mitglieder der Sozialität!

Diese sehr detailierte Beschreibung wird von Bourdieu durch die Metapher des Feldes zusammengefasst. Das Feld ist der Kampfschauplatz, in dem um Wechselkurse und Verteilung von Kapitalien gekämpft wird. Auch wenn Bourdieu mit seiner sehr generalisierbaren Metapher des Kapitals einen weiten Anwendungsspielraum bietet, so ist doch offensichtlich zu erkennen, dass die von Elias dargestellten Prozesse als Vorlage der Abstraktion zu betrachten sind. So finden sich der Prozess des Internalisierens, des Kontrollierens und des (konformen) Handelns – wie von Elias beschrieben – bei Bourdieu unter der Sammelkategorie des symbolischen Handelns wieder. Die Reproduktion von Außenseitern – eine detailierte Analyse bei Elias – ist bei Bourdieu zu der Beschreibung eines Aneignungsprozesses von Kapital, also einem Verteilungskampf – abstrahiert worden.

Bourdieu leistet einen wesentlichen Beitrag durch die von ihm verwendeten Metaphern, wie beispielsweise die des Feldes oder des symbolische Kapitals – Begriffe, die als Ordnungskategorie von großem Wert sind. Ob sie jedoch auch einen erklärenden Charakter besitzen, erscheint aufgrund ihrer Allumfasstheit eher fraglich.

Die Übereinstimmungen der beschriebenen Prozesse lassen sich anschaulich anhand der Petrinetzmodelle aufzeigen, da hier die Zusammenhänge besonders deutlich werden. So ist beispielsweise die Selbsterhaltung des Feldes (vgl. Abb. 6.31) bei Bourdieu nahezu identisch im Ablauf mit der Reproduktion von Normen bei Elias (vgl. Abb. 6.13). Elias geht in der Beschreibung der Aktionen von der Gruppe und den Akteuren aus, während Bourdieu dies in dem abstrakten Begriff des Feldes und des Kapitals verbirgt. Die textuellen Darstellungen scheinen nicht vergleichbar zu sein. Stellen wir Abb. 6.13 und Abb. 6.31 gegenüber – geschehen in der Abbildung 6.64 – so ergibt sich nahezu eine direkte Korrespondenz der Begriffe *und* der Prozesse.

Eine ebenso große Übereinstimmung zu Elias und Bourdieu zeigt sich mit der Theorie von Popitz. Die Konstruktion sozialer Ordnung versteht Popitz als Aufbau und Auf-Dauer-Stellen sozialer Regelmäßigkeiten. Akteure müssen sich notwendig an Verhaltensregelmäßigkeiten orientieren und investieren zahlreiche Handlungen in die bestehende Ordnung, deren Ertrag sie nicht verlieren möchten. Deshalb verleihen sie jeglicher sozialen Ordnung eine Basislegitimation: den

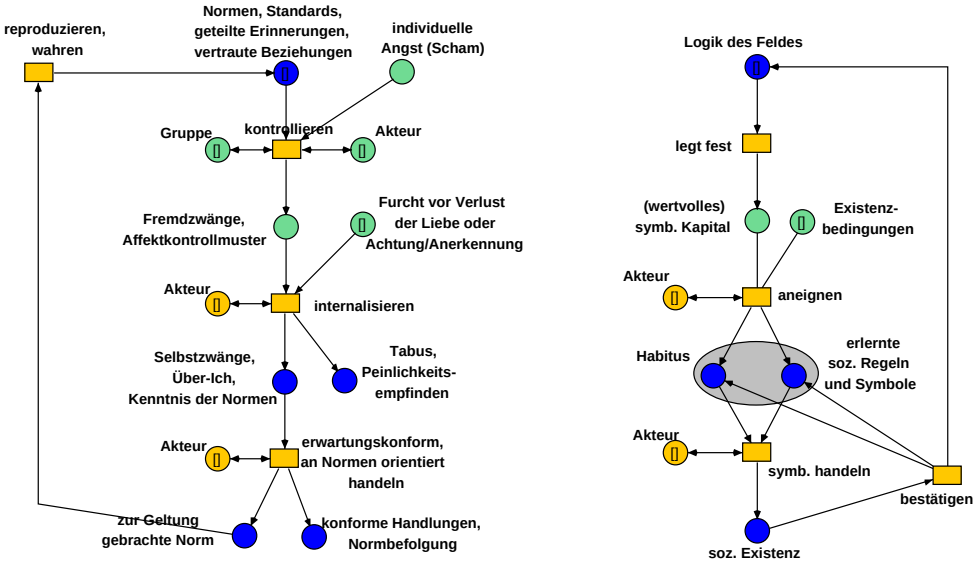


Abbildung 6.64: Reproduktion der Normen und Selbsterhalt des Feldes

„Ordnungswert“. Der Ordnungswert ist als unterbewusstes Element dem Habitus sehr nahe. Die Verstrickungen und der dadurch bedingte Wunsch nach Ordnungserhalt (und damit Fortbestehen des Lebenswerks) erweitert die von Elias angegebenen Akteursmotive: Anerkennung usw. Ähnliches gilt für den Wunsch nach Orientierung.

Wenngleich implizit, ist in Popitz' Theorie ebenfalls der Kampf – nämlich um die Etablierung und Durchsetzung von Normen – der Motor gesellschaftlicher Entwicklung. Zentrales Element bei Elias sind Prozesse der Machtbildung, allerdings weniger als Kampf gegen Machtzentren, sondern eher als relativ alltägliche, unscheinbare Begebenheiten. Machtkämpfe in diesem Sinne entsprechen den Kapitalverteilungskämpfen innerhalb eines Feldes bei Bourdieu.

Die Ähnlichkeiten zu Elias zeigen sich in der Beschreibung der beteiligten Prozesse. Die Sanktionierung, Drohung, Generalbelohnung etc. als Element der Machtbildung explizieren die Kontrolle des einzelnen durch die Gruppe, wie Elias sie beschreibt. Die Autorität und ihre Reflektion durch den einzelnen entspricht dem von Elias beschriebenen Internalisierungsprozess. Der Zugehörigkeitsausschluss (Distanzierung bis Degradierung) ähnelt den Methoden der Ausgrenzung.

Die Nähe zu Bourdieu und Elias zeigt sich weiterhin bei Popitz in der Beschreibung der Machtetablierung. Machtetablierung verläuft als vierphasiger Prozess, dessen Beschreibung in seiner Detaillierung über die Darstellung bei Elias und Bourdieu hinausgeht. In der ersten Phase der Etablierung ist die Bedingung für das Selbstdeuten als Gruppe der exklusive Zugang zu einer Ressource verbunden mit Organisationstalent. Für Elias ergibt sich die Selbstdeutung als Ergebnis funktionaler Ausdifferenzierung. Bei Bourdieu tritt dies in Form distinktiven Kapitals zu Tage. Die zweite und dritte Phase der Machtetablierung, die eine Stabilisierung der Macht anstrebt, hat seine Entsprechung bei Bourdieu

im Prozess der Offizialisierung, durch den Herrschaft und Rangunterschiede legitimiert werden. Die vierte Phase der Machtetablierung, in der eine Tradierung der Macht angestrebt wird, indem Machttitel und -positionen geschaffen werden, entspricht dem Bourdieuschen Prozess des Institutionalisierens.

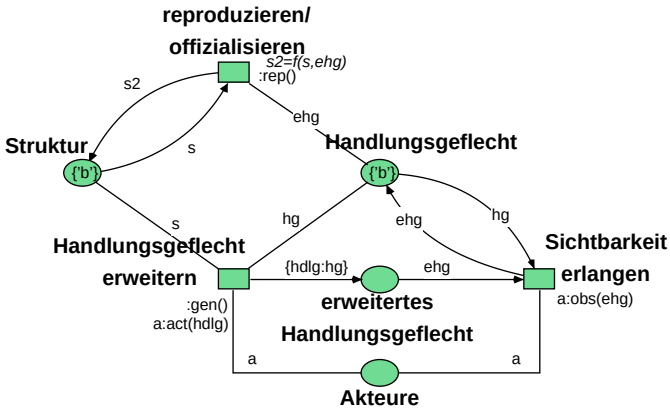


Abbildung 6.65: Abstrakte Sozialstruktur

Diese Gemeinsamkeiten bilden einen starken Hinweis für die Bedeutung der beschriebenen Prozesse und Strukturelemente, so dass wir zu dem Schluss kommen, dass diese integraler Bestandteil des Mikro/Makro-Modells sein müssen. Eine Modellierung der dialektischen Relation von Strukturen und der Strukturdynamiken, die in Abb. 6.63 bereits angedeutet ist, geschieht, indem die Marken der Stelle Strukturation detailierter modelliert werden. Die Marken sind ihrerseits wiederum Netzinstanzen, nämlich die Sozialstruktur, dargestellt in Abb. 6.65. Beide Netze sind durch Kanäle miteinander gekoppelt: Das abstrakte Bedingen/Ermöglichen der Handlungen durch die Strukturationen in Abb. 6.63 entspricht in einem tieferliegenden Prozess in Abb. 6.65: Das Handlungsgeflecht wird durch das Handeln der Akteure erweitert. Dieses erweiterte Handlungsgeflecht kann dann Sichtbarkeit erlangen. Wird diese Dynamik des Handlungsgeflechts reproduziert oder sogar offizialisiert, so entspricht dies auf der höheren Ebene aus Abb. 6.63 dem abstrakteren Prozess der Reproduktion.

Als Marken der Stelle Struktur finden sich die Darstellungen der Konzepte der Norm, der Praxisform, der Kapitalsorte, der Gruppe, der Machtzentren etc. – also jene Konzepte, die bei den Autoren in augenfälliger Übereinstimmung auftraten.

Die Dynamik des Handlungsgeflechts – und damit aufgrund der prozesshaften Betrachtungsweise der Gesellschaftstheorie auch der Struktur – begegnete uns im Rahmen der Gesellschaftstheorien in vielerlei Form. Insbesondere beschreiben Elias und Bourdieu dies konkret als Etablierungsprozess von Gruppen, als Reproduktion von Normen, als Kontrolle und Internalisierung, als Normenbefolgung und Anerkennung oder als Ausgrenzung von Fremden.

Ebenso sind alle strukturellen Transformationsprozesse wie beispielsweise die Offizialisierung oder die Etablierung von Macht in Sinne von Popitz Aus-

druck dieser Dynamik. Die Dynamik wird durch die Transition reproduzieren/offizialisieren zum Ausdruck gebracht.

Exemplarisch betrachten wir die elegante Konzeption des Mikro/Makro-Zusammenhangs nach Elias. Personen haben danach ein grundlegendes Bedürfnis nach Zugehörigkeit und Anerkennung, das sich als Angst vor sozialem Abstieg, Ausschluss und Anerkennungsverlust äußert. Dies ist im Modell auf der Ebene des Akteur-Netzes beschrieben. Sozialitäten „modellieren" diese Ängste und regeln (normieren) das Verhalten von Individuen, indem sie die Befolgung gewünschter Normen an die Sanktion sozialer Abwertung bzw. sozialen Ausschlusses binden. Diese Regelung wird in dem Modell durch aufeinander bezogene Schaltvorgänge der beiden Transitionen Handlungsgeflecht erweitern und Sichtbarkeit erlangen beschrieben, wobei hierbei die Stelle Struktur gerade die Normen und Sanktionsformen darstellt. Individuen übernehmen die Forderung nach Normbefolgung als „automatische Selbstzwänge", indem sie eine innere Instanz ausbilden, die die Sozialität und ihre Forderungen intern vertritt: das Über-Ich bzw. das Gewissen.

Die Modellierung steht dabei auch im Einklang mit den Theoriemodellen der vorangegangenen Kapiteln, d.h. mit dem Garbage Can Modell, dem strategischen Ansatz und den Akteurmodellen. Die abstrakte Beschreibung struktureller Dynamik zeigt die Schwächen des Garbage Can Modells. Eine Hauptkritik am Garbage Can Modell ist die Frage nach der sozialen Konstruktion der Wirklichkeit: Wie entstehen Probleme, Lösungen, Entscheidungsgelegenheiten und Teilnehmende, woraus bestehen sie und wie werden sie reproduziert? Im Garbage Can Modell werden die Entscheidungskomponenten als gegeben angesehen. Es kommt nicht auf deren Entstehung, Charakter und Beschaffenheit an, genauso wenig ist es von Belang, wer genau warum welches Problem bearbeitet. Diese Annahme ist jedoch so nicht richtig, da es auf die soziale Existenz dieser Regularien ankommt. Verglichen mit der dialektischen Struktur sozialer Prozesse aus Abb. 6.65 mit ihren wechselseitigen Bezügen zu Struktur und Akteuren ist dies eine große Simplifizierung.

Dass die zentralen Konzepte des strategischen Ansatzes in einem engen inhaltlichen Zusammenhang zum Mikro/Makro-Modell stehen, ist ebenso naheliegend: Zentraler Beschreibungsgegenstand bei Crozier und Friedberg ist das Spiel, in dem die Strategien der Akteure als Spielweisen integriert werden. Das Spiel korrespondiert direkt mit dem Handlungsgeflecht des Feldes. Mit dem Spielkonzept wollen Crozier/Friedberg das Integrations- und Kopplungsproblem von Akteur und System lösen. Nachvollziehbar ist, wie und warum die Akteure ihre Strategiewahl treffen, wodurch diese bedingt wird und wie kollektive Strategien in Spielen zusammentreffen. Unklar bleibt jedoch die Verbindung vom Spiel zum System, wie nämlich sich die Spielweisen konkret auf das System auswirken und es verändern, d.h. Offizialisierungs- bzw. Reproduktionsprozesse sind nicht ausformuliert. In großem Maße wird die Existenz von organisationalen Formalstrukturen vernachlässigt, zu denen z.B. die hierarchische Anordnung von Positionen und Abteilungen zählt. Bestehende Machtverhältnisse werden von Crozier/Friedberg ausschließlich auf der Mikroebene des Verhaltens angesiedelt und als Ergebnisse von Ressourcenverteilung, Aushandlungen und Tauschprozessen gesehen. Dabei bleibt außer acht, dass Autorität und Anweisungsbefugnisse von

übergeordneten Positionsinhabern in vielen Organisationsformen eine große Rolle spielen, und zwar im Sinne einer enormen Erhöhung der Durchsetzungs- und Gewinnchancen durch Definitionsmacht und bessere (formal bedingte) Ressourcenausstattung. Macht als relationales und kontingentes Konzept findet sich auf der Ebene des Feldnetzes als Struktur wieder, die eine Voraussetzung zur Verlängerung des Handlungsgeflechts ist.

Auch die Akteurstheorie bezieht sich auf die Struktur. Die von Schimank betrachteten Akteurskonstellationen entsprechen den Handlungsketten. Sie erzeugen Strukturdynamiken, die nach Schimank speziell Einfluss auf drei Kategorien von Strukturen nehmen: Deutungs-, Erwartungs- und Konstellationsstrukturen (vgl. Kapitel 5.3).

Deutungsstrukturen sind kognitive und evaluative Orientierungen, die sich um kulturelle Leitideen gruppieren, also Werte wie Wahrheit in der Wissenschaft und Macht in der Politik.

Erwartungsstrukturen sind institutionalisierte normative Erwartungen wie rechtliche oder formalisierte Regeln, aber auch alle Arten informeller Regeln z.B. innerhalb von Gruppen. Viele normative Erwartungen werden in Rollen gebündelt.

Konstellationsstrukturen sind eingespielte Gleichgewichte von Akteurkonstellationen, die dann vorliegen, wenn sich ein bestimmtes Muster handelnden Zusammenwirkens von Akteuren in dem Sinne verfestigt, dass kein Beteiligter von sich aus seine Handlungsweise ändern kann. Viele Konstellationsstrukturen manifestieren sich in Verteilungsmustern – insbesondere bezüglich Macht, Wissen, Geld, Chancen der Bedürfnisbefriedigung.

Betrachten wir nun die „tragenden“ Elemente der sozialen Prozesse: die Akteure.

6.5.5 Soziale Akteure

Die Prozesse des sozialen Feldes werden von den Akteuren getragen, die als Netzinstanzen auf der Stelle Akteure liegen. Das Akteur-Netz ist in Abb. 6.66 dargestellt. Es bildet eine Verallgemeinerung der Akteurtheorien des Homo Sociologicus, des Homo Oeconomicus, des Emotional Man und des Identitätsbehaupters aus Kapitel 5.2 Alle vier Akteurmodelle sind strukturell auf einer sehr abstrakten Ebene kombiniert worden. In allen Akteurmodellen existieren die drei elementaren Prozesse des Beobachtens, Handelns und des Anpassens. Die Elemente werden durch die Strukturelemente in Beziehung gesetzt. Sie sind der Deutungs- bzw. Bewertungsrahmen des Beobachtens sowie des Handelns. Eine Anpassung des Akteurs an seine soziale Umwelt geschieht durch Modifikation der Strukturelemente.

Die allgemeinen Kategorien stehen mit den Konzepten der einzelnen Akteurmodelle wie folgt in Beziehung. Die Strukturelemente entsprechen den Normen bzw. den internalisierten Rollen des Homo Sociologicus. Für den Homo Oeconomicus finden sich hier die Ziele und die zur Verfügung stehenden Ressourcen. Im Falle des Emotional Man interpretieren wir sie als Emotionen und für den Identitätsbehaupter als die Identität.

Ein veränderndes Anpassen entspricht einer Konfliktbewältigung, die für den

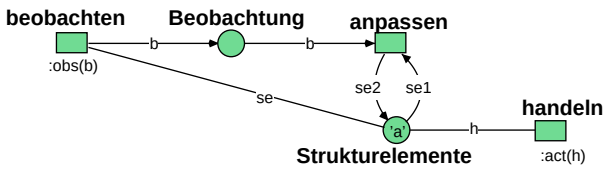


Abbildung 6.66: Abstrakter Akteur

Akteur meist in der Form von Interdependenzen mit anderen Akteuren vorliegt. Die Interferenzen äußern sich als Dynamiken der Abweichungsdämpfung und -verstärkung. Abweichungsverstärkend sind Dynamiken, die auf Aufbau oder Änderung der Strukturen (Erwartungs-, Deutungs- oder Konstellationsstrukturen) hinwirken; abweichungsdämpfend sind solche, die auf Strukturerhaltung drängen. Für den Homo Sociologicus entspricht dies dem Prozess des „role making“. Der Homo Oeconomicus reagiert auf Interdependenzen durch die Anpassung seiner Ziele und Pläne. Das Anpassen enthält auch den Spezialfall der identischen Reproduktion, d.h. der Bestätigung, der Strukturelemente. Beispielsweise entspricht dies dem Wahren der Identität des Identitätsbehaupters.

Das Handeln geschieht in Abhängigkeit der Strukturelemente, wobei die Situation durch das Beobachten als Teil der Struktur verstanden wird. Die Verbindung des Handelns in Verbindung mit der Situation und den Strukturelementen ist dabei genau die Entsprechung des Akteurmodells.

Jeder Akteur ist mit dem Handlungsgeflecht aus Abb. 6.65 gekoppelt, d.h. eine Anpassung von Akteuren bewirkt, sofern sie sichtbar und relevant wird, eine Veränderung der Strukturen. Die individuellen Strukturelemente der Akteure existieren dabei als überindividuelle Deutungs-, Erwartungs- und Konstellationsstrukturen auf der Ebene des Feldes.

Die Gesellschaftstheorien betrachten dagegen den Akteur unter einem ganz anderen Blickwinkel. Hier steht nicht der Akteur im Mittelpunkt, sondern ist nur Teil der Struktur-Handlungs-Dialektik. Nichtsdestotrotz kommt er als Träger inkorporierter Strukturen ins Spiel. So beschreibt beispielsweise bei Bourdieu der Habitus diese inkorporierten Strukturen (siehe auch Abb. 6.32 für die Wirkung des Habitus auf den Akteur). Bei Elias leistet das Über-Ich als Anleihe aus der Psychologie die gleiche Aufgabe.

Auch die Organisationstheorie nach Crozier und Friedberg besitzt ein Akteurmodell, das jedoch die Rationalität der Akteure überbetont. Trotz der Hervorhebung ihrer dualistischen Sichtweise von Akteur und System legen Crozier/Friedberg tatsächlich ihren Schwerpunkt auf die Strategien und Spiele der Akteure und schildern in ausführlicher Weise, wie diese entstehen, eingesetzt werden und sich verändern können – während dem Handlungssystem der Organisation innewohnende Aspekte, die dem Handeln der Akteure Zwänge auferlegt, vage und unkonkret bleiben. Auch wird die Frage, wie und unter welchen Bedingungen sich die Strukturierung des Handlungsfeldes genau vollzieht, nicht ausreichend beantwortet.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Mikro/Makro-Wechselwirkung studiert. Wir haben dies am Beispiel der Theorie Norbert Elias' zu Kontrolle und Internalisierung betrachtet. Hierzu haben wir den Monopolmechanismus und die soziale Kontrolle zur Reproduktion von Machtzentren modelliert. Wir haben die Dualität auch bei Pierre Bourdieu in Form des Symbolkampfes und der Wechselwirkung von Habitus und Feld gesehen, bei dem sich Gesellschaftsstruktur als Produkt sozialer Auseinandersetzungen ergibt, wobei der Habitus als Erzeugungsschema für soziale Praxis und inkorporiertes symbolisches Kapital agiert. Als dritten Theoretiker haben wir Heinrich Popitz herangezogen und seine Aussagen zur sozialen Ordnung und zum Investitionswert der Akteure modelliert, bei dem sich Sozialität als notwendige Orientierung an Verhaltensregelmäßigkeiten ergab.

Die Gemeinsamkeiten dieser Modelle haben wir dann in einem Mehrebenenmodell der Mikro/Makro-Verbindung integriert, indem wir mehrere, miteinander wechselwirkende Modellebenen für Akteur, Feld und Struktur eingeführt haben. Diese Modell spiegelt in hohem Maße die Dialektik von Handlung und Struktur wider, die das Wechselspiel der Prozesse eines sozialen Feldes und der soziale Akteure ausmacht. Die Modelkonzepte gehen also insbesondere über die Akteursebene hinaus.

Teil III

DISPO: Agentensysteme als reflexive, soziale Praxisformen

„Ein Denkanstoß ist keine Gehirnerschütterung."

Lutz Wingert. *Der Geist bleibt unfassbar.*
Die ZEIT vom 30.08.2007, Nr. 36.

Überblick

Dieser Abschnitt betrachtet die Integration der im vorangegangenen Abschnitt behandelten theoretischen Ansätze. Die soziologische Analyse auf Gemeinsamkeiten wurde von Roman Langer erarbeitet und in der *Theorie sozialer Selbstorganisation* (TSSO) integriert (siehe dazu Langer, 2005). Wir stellen in Kapitel 7 die sozionische Modellierung der Theorieintegration vor. Die TSSO baut auf dem Konzept der *praktischen Anerkennung* auf. Diese wird als Reformulierung des soziologischen Handlungsbegriffs verwendet und erlaubt in Verbindung mit den Konzepten der *Vermögensstrukturen* und der *reflexiven Symbolisierung* eine Theorie sozialer Prozesse in Form von Konstitutionsdynamiken. Analog zum Vorgehen des vorangegangenen Anschnitts werden dazu Teilmodelle erstellt, die im Laufe der Modellierungsarbeit zu einem Gesamtmodell des Konstitutionsmechanismus kombiniert werden konnten. Diese Modellierung der soziologischen Theorieintegration wird dann in Kapitel 8 mit der informatischen Modellintegration aus Kapitel 6 in Verbindung gesetzt. Ausgangspunkt ist dabei die Theoriesymmetrie, die sich in der Selbstähnlichkeit der Theorieelemente und -dynamiken ausdrückt. Dies Symmetrie bildet die Grundlage der sozialen Reproduktion.

Wir zeigen, dass sich die reflexive Struktur sozialer Systeme – wie sie die TSSO beschreibt – auch in Multiagentensystemen findet. Dazu beschreiben wir Systeme als Netz von Handlungsregeln, den *Entitätensystemen*. Entitäten sind spezielle, nämlich sogenannte abgeschlossene Handlungsregelwerke. Agenten und auch Agentensysteme erweisen sich als Spezialfälle solcher Entitäten. Mit anderen Worten: Das Konzept *Agent* und das Konzept *Agentensystem* sind zwei Seiten der gleichen Medaille, die sich nur perspektivisch unterscheiden. Kapitel 8 zeigt diese Dualität auf und studiert die Wechselwirkung zwischen beiden Perspektiven. Außerdem zeigt es, wie Entitäten in Form der Sonar-Agenten geeignet operationalisiert werden können.

7 Der Konstitutionsmechanismus sozialer Systeme[1]

Die „Konstitutionsdynamik“ ist der Prozess, durch den sich Sozialität reproduziert.[2] Reproduzieren bedeutet, dass die Komponenten sozialer Einheiten immer und immer wieder neu zu erzeugen und zu stabilisieren (wobei verschiedene Komponenten zu verschiedenen Zeiten, unterschiedlich oft erzeugt und unterschiedlich intensiv stabilisiert werden). Mittels der Konstitutionsdynamik (wieder-)erzeugt sich Sozialität auch als Ganzes. Der Begriff „Konstitution“ einbegreift zwei Aspekte: „Erzeugung“ und „Reproduktion“.

Als „Dynamik“ bezeichnen wir einen strukturierten Prozess, der einer (im folgenden zu entwickelnden) spezifischen, praktischen und rekursiv-zyklischen Ablauflogik folgt.

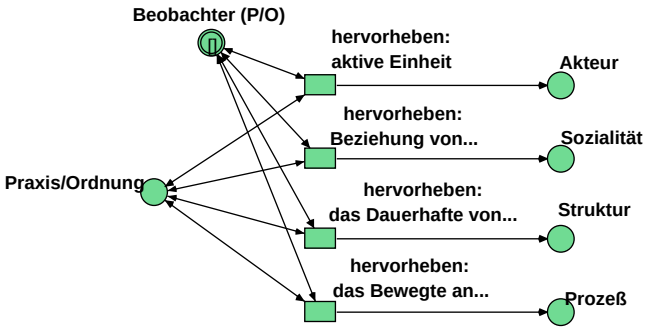


Abbildung 7.1: Attribute einer Praxis/Ordnung

„Praxis/Ordnung“ kann in erster Annäherung als „soziale Einheit“ verstanden werden. Praxis/Ordnungen sind das, was durch eine soziale Konstitutionsdynamik hervor gebracht und reproduziert wird:[3] nämlich soziale Einheiten, die praxisfähig und strukturiert (geordnet) sind – in allen Schattierungen, von der Weltgesellschaft bis zu einzelnen agierenden Elementen bzw. elementaren Aktionen. „Sozial“ schließlich ist im hier verstandenen Sinn alles, was Verhältnisse (Trennungen, Differenzen, Unterschiede und Verbindungen, Identitäten, Gemeinsamkeiten) zwischen Einheiten betrifft.

[1] Die Formulierung der Theorie der sozialen Selbstorganisation stammt von Roman Langer (Langer, 2005) und von Michael Köhler-Bußmeier mit Hilfe von Petrinetzen modelliert.

[2] „Sozialität“ heißt hier zunächst soviel wie „das Soziale an sich“ oder „jede beliebige soziale Einheit“. Genauere Begriffsbestimmungen werden im Laufe des Textes gegeben.

[3] Der Begriff wird am Ende dieses ersten Teils ausführlich hergeleitet und expliziert; wird aber im Text bereits von Beginn an verwendet. Dieses wenig didaktische Vorgehen ist der linearen textuellen Darstellungsweise geschuldet; man kann schlechterdings nicht alle Begriffe, die man verwendet, gleichzeitig zu Beginn definieren.

Eine „Konstitutionsdynamik sozialer Praxis/Ordnungen“ ist also ein praktischer, rekursiv-zyklischer, strukturierter Prozess, der Verhältnisse (Trennungen und Verbindungen) zwischen (näher zu bestimmenden) Komponenten in einer Weise erzeugt und reproduziert, dass diese eine praxisfähige Struktur-Einheit bzw. eine strukturiert-einheitliche Praxis bilden. Eine Praxis besteht aus regelmäßigen Handlungen bzw. regelmäßigem Verhalten.

Der Text stellt die Konstitutionsdynamik in folgender Weise dar. Zunächst wird das Theorem der praktischen Anerkennung entwickelt, das gewissermaßen den Handlungsbegriff der vorliegenden Theorie darstellt. Es wird gezeigt, wie praktische Anerkennung mit kommunizierendem Verhalten, der abstraktesten noch rekonstruierbaren sozialen Einheit, zusammenhängt, und wie sich kommunizierendes Verhalten als anerkennendes bereits vor und unterhalb jeder expliziten Legitimation an der Reproduktion bestehender sozialen Praktiken und Ordnungen beteiligt. Das zweite Theorem bezieht sich auf strukturelles Vermögen. Dargestellt wird, wie Akte anerkennenden und kommunizierendes Verhalten auf Dauer gestellt und in Verhaltensregelmäßigkeiten umgewandelt werden, wie Verhaltensregelmäßigkeiten sowohl als ausgeübte, erwartete und bewertete zu Strukturen werden als auch sozialen Einheiten zugerechnet und damit zu deren sozialem Vermögen werden. Als dritte Komponente der Konstitutionsdynamik wird die reflexive Symbolisierung eingeführt. Den Ausgangspunkt der Darstellung bilden hier Anerkennungen von Differenzen, u.a. zwischen Praktiken und Erwartungen. Als Reaktion auf solche Differenzen werden bestimmte Praktiken durch Symbolisierung nochmals hervorgehoben und stabilisiert; die Symbolisierung erfüllt damit eine Ordnungs- und Orientierungsfunktion. Anschließend werden typische Formen sozialer Symbolik hergeleitet. Zum Abschluss der Darstellung der Konstitutionsdynamik wird das Konzept der Praxis/Ordnung expliziert.

7.1 Praktische Anerkennung als sozial konstitutiver Prozess

Kommunizierendes Verhalten konstitutiert das Soziale und ist sein Rohstoff (vgl. dazu Abbildung 7.2): Das Soziale ist das Universum kommunizierenden Verhaltens. Jeder einzelne Akt kommunizierenden Verhaltens aber verhält sich selektiv zur sozialen Wirklichkeit: er hebt bestimmte Objekte (Inhalte, Gegenstände) hervor und vernachlässigt andere; er verweist auf seinen Träger und nicht auf mögliche andere; er wirkt sich auf bestimmte Aspekte sozialer Wirklichkeit aus und auf bestimmte andere nicht; er verrät etwas über die Ausschnitte sozialer Wirklichkeit, denen er entstammt, welche dadurch hervorgehoben werden, während er über andere nichts verrät; und er ist mit anderen Akten kommunizierenden Verhaltens in besonderer Weise verknüpft, durch die er konstituiert wird, und die insofern ebenfalls von ihm im Verhältnis zu allen anderen Akten kommunizierenden Verhaltens besonders betont werden.[4]

[4]Zur Ergänzung: Jedes Verhalten wirkt, mikrologisch betrachtet, sowohl sozial stabilisierend: zumindest insofern, als es riesige Bereiche der prozessierenden Praxis praktisch anerkennt und unangetastet lässt; als auch sozial verändernd: zumindest insofern, als es selbst relativ

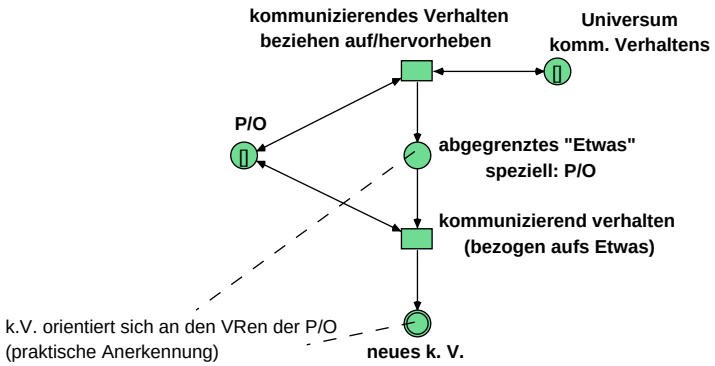


Abbildung 7.2: Kommunizierendes Verhalten

7.1.1 Verhalten kommuniziert wertende Anerkennungen

Diese mehrfache Selektivität ist eine grundlegende *Wertung* sozialer Wirklichkeit, eine Wertung, die noch vor und unterhalb jeder reflektierten, expliziten, bewusst kommunizierten gesellschaftlichen Wertung prozessiert wird. Ein Akt kommunizierenden Verhaltens wertet bestimmte Ausschnitte sozialer Wirklichkeit allein durch dies Hervorheben auf und alle anderen ab.

Kommunizierendes Verhalten verrät aber nicht nur, welche Aspekte der sozialen Wirklichkeit es besonders hervor hebt, sondern auch, in welcher Hinsicht dieser Realitätsausschnitt zu welchen anderen Ausschnitten passt und wozu nicht. Dieses Zuordnen ist aber immer zugleich ein Werten: wo kommunizierendes Verhalten „Passendes“ identifiziert, wertet es positiv, wo es „Unvereinbares“ identifiziert, negativ.[5]

Das kommunizierende Verhalten „verrät“ einfach dadurch, dass und wie es sich zur Wirklichkeit verhält – sie also in bestimmter behandelt und deutet – dass und wie es diese Wirklichkeit *anerkennt*. Kommunizierendes Verhalten anerkennt die fünf Komponenten, mit denen es relationiert ist, in genau der Weise, wie es sie selektiert (hervorhebt/vernachlässigt) und zuordnet (gemäß ihrer Geordnetheit positiv/negativ wertet). Diese Anerkennung kommuniziert es durch sich selbst weiter. Die Anerkennungen (Selektionen und Relationierungen) kommunizierenden Verhaltens stellen ein erwartungsförmiges Angebot bzw. eine Anmutung an den Rest der sozialen Welt dar, den jeweils hervorgehobenen Ausschnitt ebenfalls als solchen zu behandeln: genau so hervorzuheben, zu deuten und zu behandeln wie das der fokale Verhaltensakt selbst es tut.

Mit jedem weiteren Akt, der dies täte, würde der hervorgehobene Ausschnitt stärker als solcher sozial festgelegt und verwirklicht. Der Effekt bestünde darin,

zur prozessierenden Praxis ein neues Moment darstellt, das auch hätte unterlassen werden können.

[5] Die selektiven und ordnungsbezogenen Wertungen, die kommunizierendes Verhalten „transportiert“ (genauer: erzeugt), kommen nicht aus dem Nirgendwo, sondern aus der präexistenten sozialen Wirklichkeit bzw. aus dem Bereich dieser Wirklichkeit, in dem das kommunizierende Verhalten erzeugt wird. Insofern kommuniziert Verhalten immer auch die Anerkennungen und Wertungen der Bereiche der sozialen Wirklichkeit, aus denen es stammt bzw. in denen es erzeugt wird.

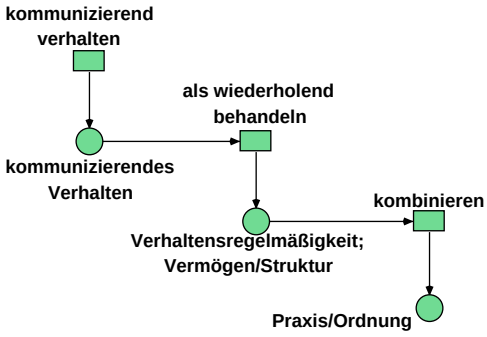


Abbildung 7.3: Praxis/Ordnungen als Kombination von Verhaltensregelmäßigkeiten

dass der fokale Akt kommunizierenden Verhaltens *mehr soziale Wirkung* erzeugen würde. Er würde sozial wirklicher (den Grad seiner sozialen Wirklichkeit steigern), indem mehrere Akte kommunizierenden Verhaltens durch ihn veranlasst wurden und ihm darüber hinaus so ähnelten (weil sie seine Selektionen und Relationierungen imitieren), dass sie als *Wiederholungen* des fokalen Aktes behandelt, gedeutet und bewertet werden können. (Dieses ist die „flüssige" Grundform dessen, was in ausgebildeten sozialen Strukturen als „soziale Bestätigung" erscheint: „die anderen sehen die Welt genau so wie ich, sie sprechen und handeln wie ich, und ich bespreche, behandle und deute die Welt wie sie".)

Mit den Verfestigungen des Realitätsausschnitts und den Wiederholungen gleicher Behandlungsweisen einschließlich Deutungs- und Bewertungsweisen würde zudem ein Komplex stabiler sozialer Wirklichkeit erzeugt, der Erwartungs- und Orientierungssicherheit erzeugen würde. Eine solche Steigerung von Regelmäßigkeit (durch Verfestigung durch Wiederholung) erzeugt soziale Werte an sich in Form struktureller Vermögen (vgl. dazu das Modell Abbildung 7.3). Darauf komme ich im nächsten Kapitel zurück.

Die Soziologie ist genötigt, solche vorreflexiven und impliziten Selektionen (bzw. Hervorhebungen und Vernachlässigungen) und Zuordnungen bereits „Wertung" zu nennen, weil diese Selektionen in die symbolisierten, explizit kommunizierten und kommunikativ reflektierten Werte, Wertmaßstäbe und Wertesysteme prägend eingehen, für die der Begriff „Wert" bislang reserviert war. Die transintentionalen Selektionen, von denen hier die Rede ist, wirken sich als soziale Wertungen aus. *So ist beispielsweise jedes Wissen und jedes Können, das nirgendwo und niemals durch kommunizierendes Verhalten hervorgehoben wird, sozial völlig wertlos (sogar inexistent); während jenes Wissen und Können, auf das sich sehr unterschiedliche Akte kommunizierenden Verhaltens an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten intensiv beziehen, sozial besonders wertvoll ist:* es wird vielfach anerkannt, kann vielfach verwendet werden und reichhaltige Wirkungen erzeugen.

Jedes kommunizierende Verhalten kommuniziert qua verhalten-zur-Welt wertende Anerkennungen, und zwar im Modus des „Behandelns-als-ob" und des „Zulassens-behandelt-zu-werden-als-ob". Soziale Praxis ist ohne Ausnahme solch

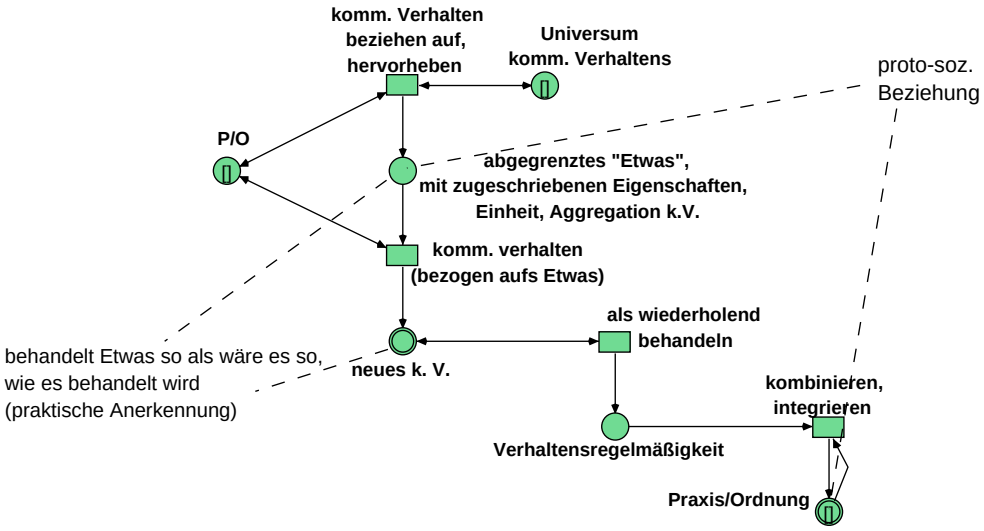


Abbildung 7.4: Erzeugen von proto-sozialen Beziehungen durch das Behandeln „als ob“

anerkennungskommunizierendes Verhalten (vgl. dazu Abbildung 7.4): Verhalten, das kommuniziert, wie etwas sein soll und wie nicht, als was etwas gelten soll und als was nicht, was als „positiv“ und was als „negativ“ gelten soll, was erwartet wird und was nicht, woran „man“ sich orientiert und woran nicht – und, vor allem, worauf überhaupt handelnd und denkend Bezug genommen werden kann/soll und worauf nicht.[6]

Soziale Praxis ist immer zugleich eine nicht-intentionale Anerkennung anderer Praktiken. Sie provoziert *vor jeder reflexiven expliziten Bestrebung* eine implizite Tendenz, dass die soziale Wirklichkeit so werden solle, wie die Praxis selbst sie bereits anerkennt. Denn das *sich so verhalten als ob {etwas sich so und nicht anders verhielte* bedeutet immer gleichzeitig, durch eigenes Verhalten dazu bei zu tragen, dass etwassichsoundnichtandersverhält.

Dieser Modus der Konstitution des Sozialen ist von so entscheidender und grundlegender Bedeutung, dass er eine eigene Bezeichnung verdient. Er soll im folgenden *Praktische Anerkennung* resp. *anerkennende Praxis* (abkürzend für „wertende Anerkennung kommunizierendes Verhalten“) heißen, kurz Anerkennung oder Praxis.

7.1.2 Praktische Anerkennung ist transintentional

Praktische Anerkennung ist der grundlegende Prozess der Selbststrukturierung des Sozialen. Akteure, die mittels kommunizierenden Verhaltens etwas anerken-

[6] Der Begriff der praktischen Anerkennung ist mehrdimensional. Seine erste Dimension ist Hervorhebung/Vernachlässigung: Anerkennung erkennt etwas und verkennt anderes. Seine zweite Dimension ist Aktivität/ Passivität: Anerkennung schreibt etwas zu und nimmt etwas hin bzw. an; sie erfindet und entdeckt. Die Dritte Dimension von Anerkennung ist Verbindung/Differenz: Sie erkennt (fügt) „etwas“ etwas anderem *zu* und *ab*erkennt ihm anderes.

nen, nehmen dieses von ihr selbst hervorgehobene „Etwas“ als „wahr“ an (sie nehmen es als solches wahr): sie anerkennen (glauben), dass dieses Etwas so ist und sich so verhält, wie es ihnen erscheint. Das hat, gemäß dem Thomas-Theorem[7] Folgen: Die Akteure verhalten sich bis auf weiteres so, als ob es das, was sie anerkennen, tatsächlich gäbe, und zwar genau so, wie sie es anerkennen, mit seinen ihm zu- und an ihm anerkannten Grenzen und Qualitäten. Sie verhalten sich dem Anerkannten gegenüber so, als wäre es so, wie sie es anerkennen. Das heißt, sie behandeln es so, wie sie meinen, dass es behandelt zu werden „verdiene“, bzw. wie es behandelt zu werden erlaubt, und anerkennen (glauben), dass dieses Verhalten ihm angemessen sei.

Dabei spielt zunächst einmal, und hier kommt eine Art „Pfeffer“ in das Geschilderte, gar keine Rolle, wie das Anerkannte „wirklich“ ist, d.h. wie es sich selbst anerkennt, wie dritte Beobachter es anerkennen etc. Es wird zunächst *lediglich als solches anerkannt, unabhängig davon, über welche Eigenschaften und Grenzen es sonst noch verfügt* und ob es ohne diese Anerkennung überhaupt eine Einheit wäre. Solche Anerkennungen können natürlich von Akteur zu Akteur unterschiedlich ausfallen. Genau um solche Fragen – wer (was) auf welche Weise als wer oder was anerkannt werden solle – pflegen sich die grausamsten der Menschheit bekannten Konflikte zu drehen, ungeachtet des Sachverhalts, dass die *auffälligen*, öffentlich-explizit benannten Anlässe für Konflikte sich selten direkt darauf beziehen.

Das liegt daran, dass praktische Anerkennung *transintentional* ist. Die anerkennend Tätigen ahnen nicht, dass, sie ganz grundlegend selbst die Verhältnisse hervor zu bringen suchen, die sie anerkennen. Die alltäglichen Akte praktischer Anerkennung sind unabhängig von expliziten Abwägungen und Entscheidungen, unabhängig von Intentionen und bewussten Beurteilungen: sie sind implizit, *tacitly*, unreflektiert, eben praktisch. Praktische Anerkennung wird, wie geschildert, bloß durch Verhalten, durch „Behandeln-als“ mitgeteilt: die Be-Handelnden müssen davon, dass sie hier Anerkennungen kommunizieren, in keiner Weise etwas ahnen oder gar wissen, um dennoch diese anerkennende Praxis zu reproduzieren, die sie dann – mit einem anderen Schritt, man möchte sagen: in einem anderen Realitätsbereich, der reflexiv symbolisierten Wirklichkeit – bewusst, gezielt, reflektiert und explizit akzeptieren oder ablehnen mögen. Praktische Anerkennung/ anerkennungskommunizierendes Verhalten hat überhaupt nichts mit explizit symbolisierten oder gar institutionalisierten Drohungen und Sanktionen oder Anreizen und Versprechungen zu tun. Die dargestellten Prozesse spielen sich weit „unterhalb“ jeder expliziten Legitimation, weit entfernt von jeder bewussten Behandlung ab, sie können vollständig unabhängig vom subjektiv gemeinten Sinn und von „rationalen“ Begründungen ablaufen und tun das auch: *Praktische Anerkennung kann vollständig transintentional prozessieren.*

Es ist nicht die Absicht eines Zeitschriftenrezipienten, das Wirtschaftssystem anzuerkennen, wenn er die Zeitschrift kauft; es ist nicht die Absicht einer Studentin, den Forschungs- und Lehrbetrieb in seiner gegenwärtigen Gestalt zu unterstützen, wenn sie an Seminaren teil nimmt; es ist nicht die Absicht eines Wurstkäufers, Tiere schlachten zu lassen.

[7] “If men define situations as real, they are real in their consequences.”

7.1.3 Der zweischneidige transintentionale „Gesellschaftsvertrag“

Praktische Anerkennung bzw. anerkennungskommunizierendes Verhalten ist *der* sozial konstitutive Prozess. Wenn einem Aspekt sozialer Wirklichkeit – gleichgültig ob einer Verhaltensweise, einem Akteur, einer Organisation oder einer Gesellschaft – anerkennungskommunizierendes Verhalten dauerhaft verweigert wird; wenn sich also nichts und niemand mehr so verhält, als ob es ihn gäbe; wenn alles auf sie bezogene kommunizierende Verhalten eingestellt wird – dann werden die Beziehungen zu jenem Wirklichkeitsaspekt abgebrochen, er wird seiner Relationen und Qualitäten beraubt; was gleichbedeutend damit ist, dass seine Qualitäten und Strukturen zerfallen: dieser Aspekt sozialer Wirklichkeit wird über kurz oder lang zerstört oder aufgelöst.[8] Gegenstände, Personen etc., auf deren Verhalten und Verhaltensresultate sich (noch) kein kommunizierendes Verhalten (mehr) bezieht, die (noch) von niemandem (mehr) behandelt, beobachtet, bemerkt werden, wirken sich in keiner Weise auf die Welt des Sozialen aus. Sie mögen in anderen Sphären existieren, *sozial* sind sie inexistent, d.h. sie sind als Elemente der sozialen Wirklichkeit noch gar nicht entstanden oder bereits verschwunden.[9]

Alle sozialen Akteure und Systeme sind deshalb dazu genötigt, die praktische Anerkennung anderer Akteure und Systeme zu „verdienen“: zu erhalten oder zu steigern, jedenfalls aber nicht zu verlieren. *Jeder Akteur (jedes System)*

[8] Im Grunde ist jede Veränderung eine begrenzte Auflösung oder Einstellung bestimmter Qualitäten/Verhaltensweisen und eine Neukonstituierung anderer Qualitäten/Verhaltensweisen. Wieder einmal ist entscheidend, wo der qualitative Umschlagpunkt zwischen Noch-Veränderung und Schon-Auflösung gezogen wird.

[9] Einige Beispiele. (a) Ein Gedanke, von einer Person flüchtig vor sich hin gesagt, aber nie anderen gegenüber geäußert, der das Verhalten dieser Person weiter nicht beeinflusst und sich deswegen auch nicht über ihr kommunizierendes Verhalten hindurch auf andere Personen, Handlungen, Organisationen etc. auswirken kann – ein solcher Gedanke ist ebenso wenig Element der sozialen Welt wie etwa eine vergessene Hochkultur. (b) Ein blinder Passagier, solange er unbemerkt bleibt, ist inexistent für alle anderen Personen, die sich auf dem Schiff aufhalten. *Es gibt ihn für sie nicht.* Sozial inexistent sind auch der Säugling, der ausgesetzt, aber von niemandem gefunden wird, und die Toten, an die sich niemand mehr erinnert und die weder in Texten, Filmen etc. noch in sonstigen Artefakten Spuren hinterlassen haben. (c) Radiert eine politische Führung bestimmte zu *non gratae* gewordene Personen aus ihren Geschichtsbüchern und Fotografien, so existieren sie für diejenigen, die die entsprechende Geschichte nur aus diesen Büchern, Reden und Fotos kennen, nicht. (d) Ist weiten Teils unbekannt, dass Gerechtigkeit eine Kontingenzformel ist (Luhmann 1992), dann ignoriert die betreffende Sozialität die Tatsache, dass das, was als gerecht gilt, ihre kontingente soziale Setzung ist. (e) Eine Studentin, die die akademischen Gepflogenheiten nicht kennt, weil sie aus einem „bildungsfernen“ Milieu kommt, behandelt diese Gepflogenheiten zunächst notwendig so, als existierten sie nicht. Das legt ihrer akademischen Karriere einige Steine in den Weg. Überall liegen – für sie unsichtbare – Schlipse herum, auf die sie tritt, was ihr übel genommen wird, worüber sie aber kein Feedback bekommt (an der Universität lernt man nicht über das Erhalten negativer Sanktionen, sondern über das Nicht-Erhalten positiver Gratifikationen); den Subtext der akademischen Sprache muss sie erst mühsam lernen, ebenso die verschwiegenen Tricks, mit denen Forschung und Lehre betrieben wird, und die in keinem Lehrbuch stehen. – In diesem Sinne ist alles, was spurenlos versunken ist oder erst erfunden/entdeckt werden muss; all das, worüber niemand spricht und das in keiner Aufzeichnung oder Überlieferung festgehalten ist; alles, was niemals benutzt, ja nicht einmal wahrgenommen wird; alles, was wirkungslos verpufft und von dessen Existenz niemand weiß – all das ist nicht Bestandteil der sozialen Wirklichkeit.

ist existenziell darauf angewiesen, von anderen Akteuren (Systemen) regelmäßig mit anerkennungskommunizierendem Verhalten „versorgt" zu werden. Er (es) ist dazu *gezwungen*, sich so zu verhalten, dass andere Akteure (Systeme) sein Verhalten – und damit ihn (es) selbst – anerkennen können.

Sie müssen sich „gefallen" lassen, dass sie selegiert und relationiert werden, dass ihnen Qualitäten und Zuordnungen genau so zugefügt werden, wie es eben geschieht. In den alltäglichen massenhaften Akten ihres gewissermaßen naiv-eingeborenen praktischen Anerkennens konfirmieren sie die soziale Welt, wie sie ist. Mit jeder ihrer ungezählten, scheinbar unbedeutenden Verhaltensweisen knüpfen Akteure/Systeme am Netz der bestehenden sozialen Strukturen. Sie lernen, *in* der sie umgebenden Praxis mitzutun, ihre Regeln zu beachten, ihre Symbole zu verwenden, in ihr zu agieren, bis sie traumwandlerisch kontextsicher die wesentlichen Regeln befolgen und anwenden können. Ohne es zu wollen oder auch nur wahrzunehmen tendieren sie dahin, dazu bei zu tragen, dass die bestehende soziale Wirklichkeit in ihrem So-Sein bestätigt und bestärkt wird. Die „Kenntnis", die die Systeme/Akteure von diesen basalen Prozessen haben, ist ein *tacit practical know how.*

Wenn es einen „Gesellschaftsvertrag" gibt, dann ist es jene unbeabsichtigte, verschwiegene Einverständniserklärung, diese nirgendwo sichtbare Blanko-Legitimation, die niemals unterschreiben wird, die aber in Kraft tritt völlig unabhängig davon, wie die Akteure/Systeme „ihre" soziale Wirklichkeit „bewusst", d.h. explizit reflexiv symbolisiert, bewerten. Sie besteht im Mitmachen, *ohne* nennenswerten Widerstand zu leisten und *ohne* die gängige Praxis wesentlich zu ändern. Sie prozessiert, vor und unterhalb aller diskursiv-bewussten – sprich: symbolisch reflektierten – Legitimationen im Modus von *tacit practical acts*, die unerkannten Handlungsbedingungen unterliegen und unintendierte Handlungsfolgen hervorrufen.

Der Haupt-Effekt praktischer Anerkennung ist, dass die Anerkennenden sich in ein verschwiegenes Einverständnis mit nahezu der gesamten bestehenden sozialen Welt begeben und dadurch dieser sozialen Wirklichkeit in ihrem So-Seine eine grundlegende stabile Konstanz verleihen. Dass praktische Anerkennung unüberschaubar zahlreiche Momente des Sozialen unverändert gewähren bzw. bestehen lässt und teilweise aktiv reproduziert, ist also konstitutiv für die soziale Welt: ohne praktische Anerkennung zerfiele sie. Nur was praktisch anerkannt ist, existiert überhaupt als Soziales. Nur regelmäßige praktische Anerkennung, verleiht dem Sozialen im Wege des Zulassens, Gewährenlassens, Berücksichtigens und als-wirklich-Behandelns grundlegende Stabilität.

Aber dies ist nichts an sich Positives. Denn erstens: Wenn die bestehende soziale Wirklichkeit eine gewalttätige, zerstörerische, terroristische ist, dann wird sie auf dieselbe basale Weise stabilisiert, dann speist sie sich aus denselben Quellen wie alle anderen sozialen Wirklichkeiten auch. Zweitens kann sich diese konstitutive praktische Anerkennung auf Außenseiter, Minderheiten, Nachgeborene – generell: auf sozial Schwächere – jederzeit wie ein unnachsichtiger Präge- und Schraubstock auswirken. Wer etwa einmal *praktisch* nicht mehr als Mensch anerkannt wurde wie Sklaven oder, im Nationalsozialismus, Juden, Roma und Sinti, Behinderte usw., und wer *noch nicht* praktisch als Mensch anerkannt wird, wie jene Generationen, die später einmal nicht bloß mit dem heute produzierten

Atommüll und Ozonloch sich herumzuschlagen gezwungen sind, der war bzw. ist mit der zerstörerischen Seite der praktischen Anerkennung in besonders scharfem Maße konfrontiert. Aber dies sind nur die sinnfälligsten und grausamsten Realbeispiele.

Die phänomenalen Typen, in denen sich praktische Anerkennung gesellschaftlich symbolisiert, sind „Mitläufertum", „Mittäterschaft" (Thürmer-Rohr, 1987), „schweigende Mehrheit" und „politische Mitte". Nahezu alle sozialen Akteure nehmen über die weitaus meiste Zeit ihres Andauerns eine dieser Rollen ein. Wie dies in der alltäglichen Praxis aussieht, schildern Marcuse und Popitz treffend:

Die bestehenden Verhältnisse erhalten auch für sie [gemeint sind Unterprivilegierte, R. L.] – als Bestandhaben der Verhältnisse – einen Ordnungswert. ... [Sie beginnen], in die bestehende Ordnung Interessen zu investieren. Sie tun genau das, was jeder friedliche Bürger tut, um sich über Wasser zu halten, auch in einer zwangsweise oktroyierten Ordnung: Er absolviert eine Ausbildung, die ihm in dieser Gesellschaft bestimmte Berufsaussichten gibt, er sichert sich einen Arbeitsplatz, der ihm ein gewisses Einkommen garantiert, er erdauert eine Anwartschaft auf eine erträgliche Wohnung, erwirbt das Vertrauen von Vorgesetzten und sieht zu, dass er sich nicht belastet. ... Diese Handlungen setzen keineswegs eine Bejahung der bestehenden Ordnung voraus, auch keinen besonderen Opportunismus, sondern lediglich die zur Vermeidung von Heldentum unvermeidliche Konformität. Aber sie implizieren viel mehr als das: So wie jeder daran interessiert ist, den Ertrag seiner Handlungen nicht zu verlieren, so wird er auch am Bestehen der Ordnung interessiert, in die er diese Handlungen eingezahlt hat. Seine Investitionen vermehren sich mit der schieren Dauer dieser Ordnung. (Popitz, 1999, 224-225)

Um zu leben, hängen die Menschen von Chefs, Politikern, Stellungen und Nachbarn ab, die sie dazu verhalten, das zu sagen und zu meinen, was sie sagen und meinen [...] Unter diesen Umständen ist der gesprochene Satz ein Ausdruck des Individuums, das ihn ausspricht, und jener, die es dazu anhalten zu sprechen wie es spricht, und Ausdruck einer wie immer beschaffenen Spannung und Widersprüchlichkeit zwischen ihnen. Indem sie ihre eigene Sprache sprechen, sprechen die Menschen auch die Sprache ihrer Herren, Wohltäter und Werbetexter. Daher drücken sie nicht nur sich selbst aus, ihre eigene Erkenntnis, ihre Gefühle und Bestrebungen, sondern auch etwas anderes als sich selbst. (Marcuse, 1989, 207-208)

7.1.4 Praktische Anerkennung als Reformulierung des soziologischen Handlungsbegriffs

Der Konstitutions- und Reproduktionsprozess sozialer Praxis ist in einem Ausmaß transintentional (weder kognitiv-intentional geplant noch rational berechnet), das bisher noch nicht auf einen theoretischen Begriff gebracht wurde. Natürlich kennen zahlreiche soziologische Theoretiker dieses Ausmaß. Neben Luhmann etwa Giddens, dem zu Folge Reflexivität „weitgehend in der Form praktischen Bewusstseins" vorläge, ohne dass Akteure über diese Methoden, Routinen und Verfahrensweisen bewusst – diskursiv – Auskunft geben könnten (Giddens,

1984, 36, auch 78), oder (Collins, 2000, 107): „[D]ie meisten Personen handeln die längste Zeit auf der Grundlage einer angenommenen Normalität, die nicht Gegenstand bewusster Reflexion ist. ... [D]er vorherrschende Charakter in den meisten Interaktionen [der Arbeitswelt bspw. besteht] darin, die organisatorischen Routinen als gegeben hinzunehmen".

Aber daraus ist noch nicht die Konsequenz gezogen worden, die Grundbegriffe des Handelns und Kommunizierens so zu reformulieren, dass sie es erlauben, Handeln und Kommunizieren als etwas zu begreifen, das den Handelnden und Kommunizierenden vorwiegend unterläuft, passiert, entgleitet, „heraus rutscht", zustößt; als etwas, das zumindest genau so viel rezeptive, reaktive, „automatisierte" oder quasi-mechanische, ja passive als bzw. wie (pro-)aktive und kreative Komponenten hat.[10] Joas und Sofsky haben eingefordert, den Handlungsbegriff unter diesem Gesichtspunkt weiter zu entwickeln. Um sozialen Akteuren nicht fälschlicherweise ein aktivistisches Verhältnis zur Welt zu unterstellen, müsse, so Joas (1992, 246), der Handlungsbegriff „auch Passivität, Sensibilität, Rezeptivität, Gelassenheit" umschließen. Sofsky (1996, 10-12) fordert in seinem Traktat über die Gewalt, dem Handlungsbegriff müsse ein mindestens ebenso gewichtiger Leidensbegriff zur Seite gestellt werden. Die Forderung ist umso mehr zu unterstreichen, wenn man wirkungsanalytisch vorgeht und erkennt: „Wirkung ... entsteht ... durch .. rezeptives .. Handeln" (Gresshoff u. a., 2003, 381). Mit dem Begriff der praktischen Anerkennung wird ein Konzept vorgelegt, das dieser Forderung zu entsprechen sucht.[11] Er erfasst auch rein rezeptives Verhalten: Erleiden, Erdulden und Unterlassen sowie Gekleidetsein, still Stehen, Schweigen, Umfallen, Zitiertwerden und ähnliche Fälle von mehr oder minder wirkungsvoller Passivität. Damit wird bereits grundbegrifflich ein aktivistisches Konzept des Sozialen vermieden.

Das Konzept der praktischen Anerkennung resp. der anerkennungskommunizierenden Praxis begreift darüber hinaus das Soziale als gewertet bzw. werthaltig. Die normative Dimension des Sozialen wird also bereits grundbegrifflich in die Analyse einbezogen; die Vorstellung, dass es im Sozialen „wertfreie" Sphären gäbe und Moral, Ethik, Werte, Normen einer eigenständigen, abgegrenzten Sphäre zugehören, wird dagegen dispensiert. Vielmehr wird die gesamte soziale Welt als eine anerkannte konzipiert: als eine normativ und evaluativ aufgeladene, eine (nicht) Gesollte und (Ab-)Gewertete, eine (nicht) Gewollte und (mehr oder weniger) wertvolle Welt. So gesehen wird sofort deutlich, dass die *cui bono*-Frage eine ganz entscheidende soziologische Frage ist: Wer wertet bzw. will welche gesellschaftliche Einrichtung, wie und warum – und welche verschiedenen

[10] Und zwar ohne gleich das Kommunizierende mit Kommunikation zu identifizieren, die bekanntlich nicht nicht kommunizieren kann, und damit das Nicht-Kommunizierende gleich vorweg zur Tür hinaus zu komplimentieren, um sich damit einzuhandeln, dass es durch die Hintertür (alter und ego in „Soziale Systeme") hereingeschlichen kommt und ungebeten in der Theorie Platz nimmt.

[11] Ein ähnliches Konzept hat Stolzenburg (1997, 242) mit dem „Akzeptieren der Dinge als solche bzw. in ihrem So-Sein", in dem er einen wesentlichen Modus der Selbstreproduktion sozialer Systeme erblickt, vorgelegt. Ebenfalls ähnlich Konzepte sind das (leider nicht weiter ausgearbeitete) der „Daten setzenden Macht" von Popitz (1999) und der indirekten Informationsvermittlung über Veränderungen der Umwelt („Stigmergy") von Grassé (vgl. Serugendo, 2003).

anderen Willen und Wertungen stehen ihm gegenüber? Wem dient das Gesollte, das Normen- und Wertesystem, und wem dient es nicht; wie verteilt es seine Anerkennungen?[12] Die Antworten auf diese Fragen erst machen soziale Auseinandersetzungen und ihre Ergebnisse verständlich.

Das Konzept der praktischen Anerkennung vermeidet zwei Ungenauigkeiten des symbolischen Interaktionismus (in der programmatischen Form von Blumer, 1973, 81), nämlich die Konnotationen, soziales Geschehen spiele sich ausschließlich zwischen Menschen ab und trüge vermittels seines Aushandlungscharakters vorwiegend symmetrische Züge. Anerkennung kommunizierendes Verhalten kann auch andere Träger als Menschen haben, es kann asymmetrisch ausfallen (und dies ist der Regelfall), und es kann durch stummen Zwang, Befehl etc. ohne Aushandlung durchgesetzt und befolgt werden. Hierbei trägt es zwar noch den grundlegenden „Aushandlungscharakter", den der Symbolische Interaktionismus meint, aber so einseitig, implizit und rudimentär, dass der interaktionistische Interaktionsbegriff hier kaum noch passt.

Anerkennung kommunizierendes Verhalten ist – aufmerksame Lesende wird es nicht überraschen – auch keineswegs kommunikatives Handeln im Habermasschen Sinne (Habermas, 1981). Weder impliziert es immanente Verständigungsorientierung, noch stellt es eine höhere Entwicklung gegenüber normenreguliertem und expressivem Handeln dar. Der Begriff der praktischen Anerkennung folgt vielmehr Joas' (Joas, 1992, 156) Forderung, „gemeinsame Merkmale *allen* Handelns" zu erfassen. Im Zuge dessen muss auch die kategoriale Trennung zwischen instrumentellem (strategischem) und kommunikativem Handeln als Reifizierung zurück gewiesen werden. Die Gründe: (1) Verständigungs- und Erfolgsorientierung sind, wenn man sie als „objektive" Strategien versteht – was Habermas tut, wenn er Verständigungsorientierung als objektives, in die Sprache eingelassenes Telos versteht – zwei Dimensionen *allen* Handelns. (2) Zu Stande gekommene Verständigung *ist* ein Erfolg, der strategisch angestrebt werden kann, während strategisch erfolgreiches Handeln immer auch eine praktische Verständigung des erfolgreichen Akteurs mit den Eigenschaften der bearbeiteten Objekte bzw. Subjekte darstellt. (3) Auch die Orientierung daran, wer behandelt wird, rechtfertigt einer kategoriale Trennung zwischen instrumentell-strategisch und kommunikativ nicht: Akteure behandeln regelmäßig (aus der Beobachterposition als solche erscheinende) Menschen wie (aus der Beobachterposition als solche erscheinende) Dinge, und andererseits, und zwar nicht nur als Animisten, Nicht-Menschen wie Subjekte: Haustiere, Teddybären, Gott, den Talisman, den Kosmos etc.[13]

[12] Eine weitere unmittelbare Konsequenz ist, dass soziologische und überhaupt jede Wissenschaft, da sie selbst soziale Praxis ist, ebenfalls nicht wertfrei sein bzw. sich wertfrei zu sozialen Gegenständen verhalten kann.

[13] Im Übrigen ist auch die Habermassche Unterscheidung zwischen Handlungen und Körperbewegungen bzw. Operationen (Habermas, 1981, 144-147) zurückzuweisen. Was als kommunizierendes Verhalten veranschlagt wird, entscheidet die Praxis, und kann nicht durch Dekrete wie „eine Körperbewegung ist Element einer Handlung, aber keine Handlung" sozialwissenschaftlich vorentschieden werden. Selbstverständlich kann eine Körperbewegung als kommunizierendes Verhalten behandelt werden.

7.1.5 Zweite Annäherung an den Begriff des Sozialen

Auf Basis der vorigen Rekonstruktionen kann der Begriff des Sozialen nun weiter geschärft werden. Die erste Annäherung postulierte, dass das Soziale aus allen Verbindungen bestehe, die sich durch Akte des Folgens oder Begleitens ereigneten. Präziser lässt sich jetzt formulieren: *Das Soziale besteht aus einem Universum von Folge- und Begleitungs-Relationen zwischen verschiedenen Akten anerkennungskommunizierenden Verhaltens.*

7.2 Strukturelles Vermögen – Vermögensstrukturen

Bislang drehte sich die theoretische Darstellung um flüchtigen Stoff, der bereits im Entstehen vergeht und nur zum Gegenwartszeitpunkt existiert. Jetzt wendet sie sich den Verfestigungen, dem Dauerhaften des Sozialen zu. Sie rekonstruiert damit das, was oben dekonstruiert wurde: die soziale Beziehung, und sie wird den Begriff der Beziehung mit dem Begriff der sozialen Struktur und mit dem Begriff des sozialen Vermögens (oder: Kapitals) verbinden.

7.2.1 Erzeugung von Verhaltensregelmäßigkeiten

Jedes anerkennungskommunizierende Verhalten stellt ein Angebot bzw. eine Anmutung an den Rest der sozialen Welt dar, den von ihm jeweils hervorgehobenen und anerkannten Ausschnitt ebenfalls als solchen anzuerkennen: genau so hervorzuheben, zu deuten und zu behandeln wie das der fokale Verhaltensakt selbst es tut. Wenn ein anerkennungskommunizierendes Verhalten stattfindet, dann ist es für andere Verhaltensakte trivialerweise einfacher, sich von ihm veranlassen zu lassen und sein Angebot anzunehmen, als wenn es nicht stattfände.[14] Dieser ganz einfache Sachverhalt führt zu einer *Clusterung* verschiedener Akte anerkennungskommunizierenden Verhaltens. Zunächst steigert jedes reagierende Verhalten (rV), das von einem initiierenden Verhalten (iV) veranlasst wird, dessen Wirkung (und damit den Wirksamkeits- und Wirklichkeitsgrad von iV und aller fünf mit ihm relationierten Komponenten), was wiederum die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass weitere Verhaltensakte sich von diesem neu entstandenen Wirklichkeitskomplex veranlassen lassen. *Wenn dies geschieht, werden zugleich die Relationen zwischen iV und allen rV, die von ihm veranlasst wurden, wirksamer und wirklicher.*

Mit jedem weiteren Akt praktischer Anerkennung wird der hervorgehobene Komplex sozialer Wirklichkeit stärker als solcher sozial festgelegt und verwirklicht (in seinem Wirklichkeitsgrad gesteigert). Sofern frühere und spätere Verhaltensakte miteinander als ein und dasselbe Verhalten verbunden und identifiziert („wieder erkannt“), also *zu einem Verhalten vereinheitlicht* werden, werden anerkennendes Verhalten und anerkannter Praxiskomplex dauerhaft sozial wirksam und damit zu einem stabilen Bestandteil sozialer Wirklichkeit verstetigt.

[14] Das gilt auch, wenn erwartetes Verhalten überraschenderweise unterbleibt. Aber dies ist hier noch zu vernachlässigen: an diesem Punkt der Erörterung sind Erwartungen und Überraschungen noch nicht eingeführt; die soziale Wirklichkeit, so wie sie bislang im vorliegenden Text erschien, ist erwartungslos.

Das Verhalten wird in eine *Verhaltensregelmäßigkeit* umgewandelt.[15] Verhaltensregelmäßigkeit bedeutet: Sozial als gleichartig anerkannte Akteure wiederholen sozial als gleichartig anerkanntes Verhalten in sozial als gleichartig anerkannten Situationen. Was als „gleichartig“ gilt, entscheiden diejenigen Akteure, die „X-Akteure wiederholen in Y-Situationen Z-Verhalten“ als solches und als Einheit hervor heben. Sie fassen Verhaltenssequenzen, die sich wiederholen, die Situationen, in denen sie sich wiederholen, und die Akteure, die an diesen Verhaltensabläufen beteiligt sind, als gleichartig auf.[16] Eine „Regelmäßigkeit“ ist also das, was bestimmte Akteure als regelmäßiges Verhalten begreifen, unabhängig davon, ob andere Akteure, etwa ferner stehende oder neu hinzu kommende Beobachter im gleichen Verhalten womöglich keine Regelmäßigkeit entdecken.

7.2.2 Verhaltensregelmäßigkeiten und Strukturen

Wenn anerkennungskommunizierendes Verhalten der flüssige Rohstoff des Sozialen ist, so sind Verhaltensregelmäßigkeiten die verfestigte Form des Rohstoffes. Die dauerhaften Bestandteile des Sozialen bestehen aus Verhaltensregelmäßigkeiten.

Verhaltensregelmäßigkeiten haben – als regelmäßige Wiederholungen von Verhalten – eine Zeitdimension. Über die Intervalle des regelmäßigen Wiederkehrens lässt sich hier nur sagen, dass sie äußerst variabel sind; hohe Wiederholungsfrequenz ist ein Faktor (aber bei Leibe nicht der einzige) für hohen Stabilitäts- und Wirklichkeitsgrad.

[15] Dieser Sachverhalt ist bekannt. „[D]er Wiederholungscharakter von Handlungen, die in gleicher Weise Tag für Tag vollzogen werden, ist“ auch für Giddens „die materiale Grundlage für das, was ich das rekursive Wesen des gesellschaftlichen Lebens nenne“, also für die Tatsache, „dass die Strukturmomente des sozialen Handelns .... aus eben den Ressourcen, die sie konstituieren, fortwährend neu geschaffen werden“ (Giddens, 1984, 37). An dieser Stelle nennt Giddens solche Verhaltensregelmäßigkeiten allerdings noch Routinen, was aus der Perspektive der vorliegenden Theorie überdehnt scheint. Es reicht es aus, von „Bildung“ bzw. „Etablierung von Verhaltensregelmäßigkeiten“ zu sprechen – und den Routinebegriff für speziellere Formen verfestigter Verhaltensregelmäßigkeiten zu reservieren. – „Die soziale Struktur leitet sich von den sich wiederholenden kommunikativen Handlungen ab“, betont auch Collins Collins (2000, 112) Wahrscheinlich ist ihm darin zuzustimmen, dass die „am leichtesten zu identifizierenden Bestandteile dieser Wiederholungen .. physischer Natur“ seien, nämlich Orte und Objekte, die „im Mittelpunkt der dauerhaftesten Wiederholungen stehen“. „So finden die meisten der repetitiven Strukturen ökonomischer Organisationen in bestimmten Fabriken, Bürogebäuden, Lastwagen usw. statt, und der überwiegende Teil desjenigen repetitiven Verhaltens, aus dem Familienstrukturen entstehen, folgt der Tatsache, dass bestimmte Leute tagtäglich die gleichen Räumlichkeiten bewohnen, dass die selben Frauen und Männer in den selben Betten schlafen, dieselben Körper berühren, dass dieselben Kinder geküsst, gefüttert und auch getadelt werden. Der ‚Staat' existiert auf Grund der Wirksamkeit von Gerichtssälen, in denen immer wieder Richter sitzen, auf Grund der Existenz von Polizeipräsidien, von denen aus die Polizisten immer wieder Streife fahren, auf Grund von Kasernen, in denen immer wieder Soldaten untergebracht werden, und auf Grund von Versammlungssälen, in denen Politiker immer wieder zusammen kommen.“ (Collins, 2000, 111)

[16] „Die Konstruktion sozialer Verhaltensregelmäßigkeiten bedeutet also eine *Gleichsetzung* von Verhaltensabläufen in *gleich gesetzten* Situationen. Solche Gleichsetzungen beruhen auf Abstraktionen, auf der Heraustrennung bestimmter Merkmale aus einem Kontinuum von Umständen und Aktionen.“ (Popitz, 1981, 6)

Verhalten weist, wie beschrieben, verschiedene Relationen zu anderem als ihm selbst auf. Wenn es wiederholt wird, werden diese Relationen zu sozialen *Beziehungen* – nämlich die durch das nun regelmäßige Verhalten vermittelten Relationen zwischen dem Verhaltensträger, den Trägern des bewirkten Verhaltens, dem Inhalt bzw. Gegenstand des Verhaltens und der Herkunftssozialität des Verhaltens und seines Trägers. Beide Träger, Inhalt/Gegenstand und die Herkunftssozialität müssen dabei jeweils selbst zeitstabile Einheiten verschiedener Verhaltensregelmäßigkeiten gelten.

Das Konzept sozialer Beziehungen ist damit hier abstrakter und zugleich realistischer gefasst als die Spontan-Assoziation „Zwei Akteure und eine Verbindung", von der auch Webers Bestimmung lebt. Was diese Konstellation – zwei Akteure in Verbindung – erstens erst möglich macht, zweitens von ihr bewirkt wird und drittens sie kontextuell rahmt, wird hier bereits grundbegrifflich mitgedacht.

Wenn Verhaltensregelmäßigkeiten (Beziehungen) sich ihrerseits in einer wieder erkennbaren Ordnung aufeinander beziehen; wenn also relativ fest gefügte Konstellationen von Verhaltensregelmäßigkeiten wieder erkennbar sind – dann sind soziale Strukturen entstanden.[17]

Als Regelmäßigkeiten anerkennungskommunizierenden Verhaltens stellen sie zugleich regelmäßige praktische Anerkennungen dar.

Giddens nennt wiederholte Handlungen – „Verfahrensweisen des Handelns, Aspekte der Praxis, ... Techniken oder verallgemeinerbare Verfahren ..., die in der Ausführung/Reproduktion sozialer Praktiken angewendet werden" – missverständlich „Regeln" (und muss mögliche Fehlinterpretationen mit seiner ausführlichen Behandlung des Begriffs der Regel (Giddens, 1984, 69-74) ausräumen). Er *meint* aber Regelmäßigkeiten: „[D]er Wiederholungscharakter von Handlungen, die in gleicher Weise Tag für Tag vollzogen werden, ist die materiale Grundlage für das, was ich das rekursive Wesen des gesellschaftlichen Lebens nenne" (Giddens, 1984, 37).[18]

Der Popitzsche Begriff der „Verhaltensregelmäßigkeit" erinnert nicht, wie der Regelbegriff, an die Intentionalität „gezielter Vereinbarung, geplanter Setzung und Einhaltung einer bewussten Norm" erinnert (Bourdieu, 1993, 71/72). Regeln sind der vorliegenden Theorie gemäß *reflexiv symbolisierte Regelmäßigkeiten.*

Die Bourdieuschen „Praktiken" und „Mechanismen" können als mehr oder minder komplexe (Kombinationen von) Verhaltens-, Erwartungs- und Symbolisierungsregelmäßigkeiten rekonstruiert werden.

7.2.3 Erwartungsbildung

Die soziale Welt ist, auch wenn sie strukturell zuweilen überaus starr wirkt, subkutan ständig in Bewegung, da sie aus anerkennungskommunizierendem Verhalten besteht: anerkennungskommunizierendes Verhalten ist im Moment

[17] Vgl. lat. structura: Aufschichtung, Ordnung – in diesem Fall Aufschichtung und Ordnung von Verhaltensregelmäßigkeiten.

[18] An dieser Stelle nennt Giddens solche Verhaltensregelmäßigkeiten allerdings noch Routinen, was aus der Perspektive der vorliegenden Theorie überdehnt scheint. Es reicht es aus, von „Bildung" bzw. „Etablierung von Verhaltensregelmäßigkeiten" zu sprechen – und den Routinebegriff für speziellere Formen verfestigter Verhaltensregelmäßigkeiten zu reservieren.

seines Entstehens bereits wieder im Vergehen begriffen und existiert immer nur zum je gegenwärtigen Zeitpunkt. Diese beständige Bewegung müssen Praxis/Ordnungen zur Kenntnis nehmen (anerkennen). Sie werden häufig mit Verhaltensänderungen konfrontiert oder verändern ihr Verhalten selbst; sie erfahren, dass spontanes, sporadisches Verhalten zur Regel werden und regelmäßiges Verhalten verschwinden kann. Zahlreiche soziale Strukturen bleiben nicht identisch, sondern werden modifiziert, viele Praxis/Ordnungen weisen „heute“ andere Qualitäten auf als „gestern“ etc. Praxis/Ordnungen machen so die grundlegende Erfahrung, dass soziale Praxis veränderungsoffen und damit für sie prinzipiell unter- oder sogar unbestimmt ist, und dass sie weder sicher wissen können, ob die soziale Welt tatsächlich so ist, wie sie sie anerkennen, noch, wie sie sich in Zukunft verändern wird.[19] Die erfahrenen Änderungen der Verhaltensregelmäßigkeiten (VRen) setzen Praxis/Ordnungen einem gewissen „Druck“ aus, sich auf jene Änderungen und Konstanzen einzustellen (vgl. dazu die gleichnamigen Stellen in Abbildung 7.5).

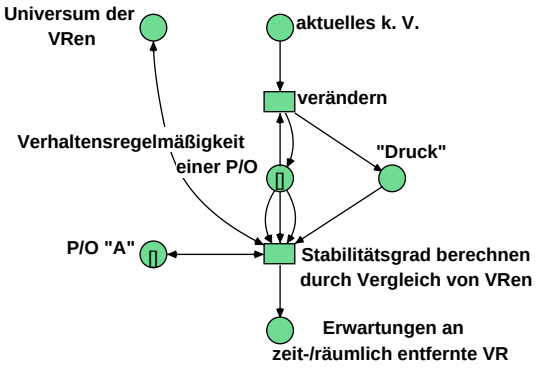


Abbildung 7.5: Erwartungsbildung an Verhaltensregelmäßigkeiten

Deshalb beginnen sie, den Stabilitäts-/Veränderungsgrad des Sozialen im Voraus zu berechnen. Sie versuchen, voraus zu sehen, in welchem Ausmaß und in welcher Geschwindigkeit Praktiken sich über die Zeit verändern oder stabil bleiben (modelliert durch die Transition Stabilitätsgrad berechnen durch Vergleich von VRen in Abbildung 7.5. Und das bedeutet: Sie bilden Vermutungen bzw. *Erwartungen* über zukünftige und an anderen, aktuell unbeobachteten Orten befindliche Verhaltensregelmäßigkeiten aus (modelliert als die Stelle Erwartungen an zeiträumlich entfernte VRen) Formaler ausgedrückt ist eine Erwartung die interne Festlegung der zukünftigen Gestalt oder Ausprägung von Verhalten.

Praxis/Ordnungen beziehen ihr Verhalten also nicht nur auf erfahrene, sondern auch auf erwartete zukünftige Verhaltensregelmäßigkeiten bzw. Praxisstrukturen. Somit weist die soziale Welt eine fundamentale Glaubenskomponente auf: das *erwartete zukünftige Verhalten*; sie basiert konstitutiv auf Kredit und Unterstellung.

[19] Treffen zwei oder mehrere Praxis/Ordnungen erstmals aufeinander, dann ist die Unterbestimmtheit – sprich: die Undurchschautheit – wechselseitig, und man kann mit Luhmann von doppelter Kontingenz sprechen.

7.2.4 P/Oen Verhaltensregelmäßigkeiten zutrauen

Erwartende Praxis/Ordnungen stellen Zusammenhänge her zwischen bestimmten Verhaltensregelmäßigkeiten und den Praxis/Ordnungen bzw. Gegenständen, die dieses Verhalten regelmäßig ausführen bzw. zeigen, an ihm beteiligt oder von ihm betroffen sind. Diese Zusammenhänge schreiben sie in die Zukunft fort: sie erwarten, dass dieselben Praxis/Ordnungen bzw. Gegenstände, die sich bisher regelmäßig „so“ verhalten haben, sich auch künftig regelmäßig „so“ verhalten werden. D.h. sie schreiben die Verhaltensregelmäßigkeiten samt ihrer Verbindung zu Praxis/Ordnungen bzw. Gegenständen in die Zukunft fort und zugleich die Verhaltensregelmäßigkeiten auch für die Zukunft diesen Praxis/Ordnungen bzw. Gegenständen zu: Sie trauen Praxis/Ordnungen/Gegenständen zu, sich auch in Zukunft regelmäßig in dieser bereits bekannten, beobachteten Weise verhalten zu können (modelliert als zuschreiben/zutrauen; zugeschriebene VR in Abbildung 7.5).[20] Die Zuschreibung der Fähigkeit, sich regelmäßig auf eine bestimmte: auf die erwartete Weise verhalten zu können, ist die eines Könnens: eines Verhaltenkönnens: eines *Verhaltensvermögens*. Sie wandelt faktisch vollzogene Tätigkeiten in Vermögen um.[21]

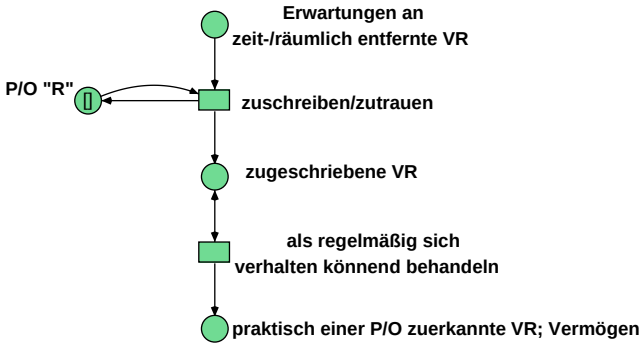


Abbildung 7.6: Zuschreibung von Verhaltensregelmäßigkeiten

Zutrauen ist aktiv: man verlangt oder erwartet, befürchtet oder erhofft,[22] dass die Praxis/Ordnungen das ihnen zugeschriebene Verhalten in Zukunft zeigen werden und stellt ihnen die praktische Anerkennung zur Verfügung, die sie zur Ausübung des erwarteten Verhaltens benötigen – nämlich indem man sein eigenes Verhalten daran orientiert (sprich: entsprechend der vermuteten Tatsache formt), dass jene Akteure sich in Zukunft so verhalten *werden*, wie man

[20] „Trauen“ bedeutet auch etymologisch „fest werden“. Insofern ist „jemandem etwas zutrauen“ rau übersetzbar mit „etwas an jemandem fest machen“.

[21] z. B. in Kompetenzen, Potenziale, Ressourcen, Rechte, Eigentum, Macht, Zahlungsfähigkeit etc. – Es kommt dabei nicht in erster Linie darauf an, wie weit sich die aktiven Akteure „tatsächlich“, d. h. von einem Beobachter aus gesehen, der über eine alternative Perspektive (eine Außensicht) verfügt, immer wieder so verhalten können, wie es ihnen zugetraut wird; das Zutrauen kann durchaus auf höchst selektiver Hervorhebung und unzutreffender Erwartung beruhen: „Die Türken nehmen uns unsere Mädchen weg“. Formen dieses Zutrauens sind u.a. Erlaubnis, Zugeständnis, Gebot, Forderung, Zumutung, Befehl, Wunsch, neutrale Vermutung, Hoffnung, Rechtgeben etc.

[22] Emotionen werden hier nur als explizit kommunizierte verstanden.

es ihnen zutraut (Transition als regelmäßig sich verhalten könnend behandeln in Abbildung 7.5).

Strukturelles Vermögen wird also durch praktisches Anerkennen (re-)produziert: Verhaltensmöglichkeiten werden eingeräumt und nicht streitig gemacht, es wird Zeit und Raum für dieses Verhalten bereit gestellt, die Verhaltensfähigkeit wird unterstellt, anderes Verhalten wird regelmäßig an dieser unterstellten Fähigkeit orientiert und macht faktisches Verhalten damit zu einem stabilen, verhaltensbeeinflussenden Vermögen. Die faktische Ausübung des kapitalisierten Verhaltens wird berücksichtigt und in Kauf genommen.

Wenn jene nun sozial vermögenden Praxis/Ordnungen sich dann tatsächlich so verhalten, wie es von ihnen erwartet wird, ist dieses ihr Verhalten also plötzlich mehr als es selbst: Es ist Aktualisierung eines Verhaltenkönnens, eines Vermögens: Es ist Einsatz, Realisierung, Aktualisierung von – Vermögen. (Stelle praktisch anerkannte VR; Vermögen von P/O R in Abbildung 7.5). Von nun an aktualisieren Akteure einfach dadurch, dass sie sich entsprechend verhalten, das ihnen zuerkannte Vermögen.

Auf die anerkennenden Akteure wirkt die oben (vor den Beispielen) erwähnte Verhaltensaktualisierung wie eine Bestätigung, dass die aktiven Praxis/Ordnungen über dieses Vermögen tatsächlich verfügen, wodurch ihnen ihr Zutrauen als gerechtfertigt bzw. realistisch erscheint, was ihre Orientierungssicherheit steigert. Erweist sich dagegen das Zutrauen als ungerechtfertigt und sinkt die eigene Orientierungssicherheit, kommt das einer Enttäuschung oder Überraschung gleich.[23]

Verhaltensregelmäßigkeiten und Vermögen hängen also wie folgt zusammen (vgl dazu das kombinierte Übersichtsmodell in Abbildung 7.7). (a) Bestimmte aktive Praxis/Ordnungen (hier P/O A) treten in Verbindung mit bestimmten Verhaltensregelmäßigkeiten auf: Sie üben sie aus, sind daran beteiligt oder davon betroffen. (b) Bestimmte rezeptive Praxis/Ordnungen[24] (im Modell: P/O R) anerkennen diese Verbindung zwischen P/O A und Verhaltensregelmäßigkeiten (im Modell: VR) praktisch *und* verlängern diese Verbindung in die Zukunft, indem sie sie erwarten: Sie trauen den P/O A zu, sich so zu verhalten, wie diese es bisher getan haben. (c) P/O A und P/O R behandeln sich selbst und einander so, als träfe die Erwartung zu, dass die Verbindung zwischen Verhaltensregelmäßigkeiten und P/O A bestünde und auch in Zukunft bestehen würde. (d) Dadurch ist faktisches Verhalten von P/O A zu Vermögen geworden: dem Vermögen einer Praxis/Ordnung, sich auf bestimmte Weise zu verhalten. Kurz: P/O A wird von P/O R praktisch anerkannt als (= so gedeutet und behandelt wie) eine P/O, die sich so verhalten *kann*; daraus resultiert ihr Vermögen, etwas zu tun und zu bewirken: ihr Vermögen.

[23] Die Zuerkennung von Vermögen schließt deshalb für den Vermögenden nicht nur das Recht, sondern auch die Pflicht ein, dieses Vermögen handelnd auszuüben – mitsamt der Übernahme und Verwendung entsprechender Symbole, Eigenschaften und Praktiken, Rangpositionen und Funktionen.

[24] Ob eine Praxis/Ordnung aktiv oder rezeptiv ist, ist situationsabhängig; „aktiv“ und „rezeptiv“ sind relationale Begriffe. Eine Praxis/Ordnung verhält sich in der Regel gleichzeitig aktiv und rezeptiv – eine Belegschaft streikt und wertet die öffentliche Berichterstattung über ihre Aktionen aus; eine Person beobachtet das Publikum während sie spricht.

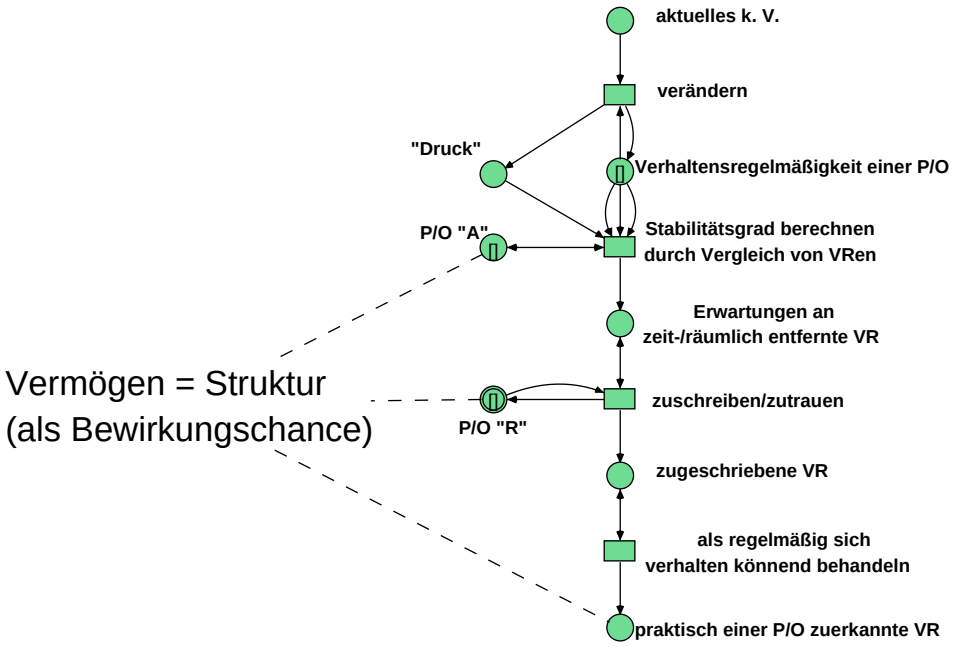


Abbildung 7.7: Verhaltensregelmäßigkeiten und Vermögensbildung

Popitz erläutert dies am Beispiel eines Kindes: „Was [d] das Kind [c] erfolgreich zustande bringt, erfährt es wesentlich im Kontext sozialer Aufmerksamkeit, von [b] Beifall und Missfallen, Hilfen, Stimulierungen, Korrekturen. Auch wenn es eine gewisse physische Selbstevidenz des Erfolges gibt, – was ‚geschafft' werden kann, welche Kompetenzen [= Vermögen, R. L.] erwartet werden können, das ist wesentlich durch den sozialen Erfolg, durch die Anerkennung [a] anderer definiert." (Popitz 1999: 118).[25]

Mit den Verfestigungen des Realitätsausschnitts und den Wiederholungen gleicher Behandlungsweisen einschließlich Deutungs- und Bewertungsweisen wird zudem ein Komplex stabiler sozialer Wirklichkeit erzeugt, der Erwartungs- und Orientierungssicherheit erzeugt. Eine solche Steigerung von Regelmäßigkeit (durch Verfestigung durch Wiederholung) erzeugt soziale Werte an sich in Form struktureller Vermögen.

Verhaltensregelmäßigkeiten treten niemals isoliert, sondern immer in Konstellationen bzw. Kombinationen auf, das heißt gleichzeitig oder in einer stabil bleibenden zeitlichen Reihenfolge aneinander anschließend. Eine solche Konstellation von miteinander kombinierten Verhaltensregelmäßigkeiten (Transition kombinieren) bildet eine aktionsfähige soziale Einheit. Wir nennen sie Praxis/Ordnung.

[25] Zuerkennung von Vermögen ist keineswegs ein Prozess, der von denen, die das Vermögen zugewiesen bekommen, immer oder auch nur in den meisten Fällen positiv anerkannt wird, sondern er wird im Gegenteil oft als Zumutung oder Zwang erlebt – insbesondere bei der Zuerkennung negativ gewerteten Vermögens („Du kannst nur stören, sonst kannst du nichts").

7.2.5 Struktur und Vermögen: Zwei Perspektiven auf dieselben Verhaltensregelmäßigkeiten

Vermögen sind in der sozialen Welt also Verhaltensregelmäßigkeiten, die von bzw. an bestimmten Praxis/Ordnungen erwartet bzw. ihnen zugeschrieben werden. Und noch etwas, von der soziologischen Begriffstradition aus betrachtet vielleicht Ungewöhnliches, ist der Fall: Genau diese durch Aktualisierungserwartungen stabilisierten Verhaltensregelmäßigkeiten sind die sozialen *Strukturen* einer Praxis/Ordnung. Während eine Praxis/Ordnung eine Kombination von Verhaltensregelmäßigkeiten ist, sind ihre Strukturen eine Teilmenge davon, nämlich alle an und von ihr sozial erwarteten Verhaltensregelmäßigkeiten.

Vermögen *ist* Struktur! Soziale Strukturen erhält man, wenn man an faktischen und erwarteten sozialen Verhaltensregelmäßigkeiten gewissermaßen den *Beziehungsaspekt* hervorhebt, also die sozialen Beziehungen zwischen Praxis/Ordnungen akzentuiert. Soziales Vermögen erhält man, wenn man an denselben Verhaltensregelmäßigkeiten den *Eigenschaftsaspekt* hervorhebt, also eine Praxis/Ordnung selbst (und nicht Beziehungen zwischen Praxis/Ordnungen) in den Betrachtungsfokus stellt. Soziale Strukturen sind Vermögensstrukturen, und soziale Vermögen sind immer strukturelle Vermögen. Die Begriffe „strukturelles Vermögen“ und „Vermögensstrukturen“ sind zwei Aspekte derselben Sache – und damit sind „Vermögen“ und „Struktur“ in der sozialen Welt ebenfalls zwei Seiten einer selben Medaille, die da heißt: erwartete und aktualisierte Verhaltensregelmäßigkeiten.

Strukturen stellen demzufolge nicht einfach eine Art Skelett der stabileren Verhaltensregelmäßigkeiten für Praxis/Ordnungen dar, sondern sind gleichzeitig immer auch Mittel, um verändernd, und sei es stabilisierend, auf die soziale Wirklichkeit einzuwirken. Strukturen *sind* das Handlungsvermögen sozialer Praxis/Ordnungen, ihr Verhaltens- und Bewirkungspotenzial – und damit setzen sie gleichzeitig auch Begrenzungen und Beschränkungen dieses Potenzials, insofern fehlendes Struktur-Vermögen bestimmtes Verhalten nicht gestattet bzw. ausschließt. Vermögensstrukturen bzw. strukturelle Vermögen sind die Chance zum gestaltenden Eingriff ins Soziale, zur Gestalt(ung) einer oder mehrerer (Teile von) Praxis/Ordnung(en).

Die strukturelle Fähigkeit, die soziale Wirklichkeit mit eigenem Verhalten „bewirken“, d.h. verändernd oder stabilisierend beeinflussen und gestalten zu können, stellt den Nutzen bzw. Gebrauchswert sozialer Vermögensstrukturen für Praxis/Ordnungen dar. Maß des Gebrauchswerts ist der Grad der Wirksamkeit eines Vermögens; der Grad, in dem es dazu verhilft, etwas sozial *verwirklichen* oder sozial *entwirklichen* zu können.[26]

In dieser Kopplung liegt ein Clou der sozialen Welt. Denn indem von einem Akteur dauerhaft erwartet, d.h. dem Akteur zugeschrieben oder *zugetraut* wird, bestimmte Handlungen regelmäßig zu vollführen, dann wird diese Handlungsregelmäßigkeit zu einem *Potenzial*, zu einem Handeln-Können des Akteurs: ihm werden auf Basis der Erwartung Räume, Zeiten und Ressourcen eingeräumt, die es ihm ermöglichen, tatsächlich so zu handeln (und niemand hindert ihn

[26] Diese Begriffsfassung impliziert, um es noch einmal explizit zu schreiben: Strukturen sind wertgeladen, sie sind für Praxis/Ordnungen mehr oder minder wertvoll.

daran). Die Kopplung *Erwartung des regelmäßigen Ausübens von Handlungen durch diesen bestimmten Akteur* erzeugt ein Handlungsvermögen dieses Akteurs. Handlungsvermögen – die Fähigkeit, zu Handeln oder Handeln-Können – ist nun aber die Gemeinsamkeit dessen, was in der soziologischen Literatur als *Kapital* beschrieben wird. Deswegen bestehen soziale Strukturen – von Akteuren erwartete Handlungsregelmäßigkeiten – aus Kapitalien, und Kapitalien sind Momente sozialer Strukturen. Wir sprechen deshalb im folgenden von *Kapitalstrukturen.*[27]

7.3 Reflexive Symbolisierung – symbolische Reflexion

Die soziale Welt erscheint den Menschen als eine ungeheure Ansammlung von Symbolen – so könnte man in Variation des berühmten Marxschen Satzes sagen –, als eine unübersehbare Vielfalt von Phänomenen, die mehr als sich selbst bedeuten, in denen sich nämlich die soziale Welt und ihre Vermögensstrukturen darstellen und ausdrücken.[28] Jedes Wort, jede Handlung, jedes Ding, jede Geste ist interpretierbar, ist als Hinweis auf die Praxis/Ordnungen lesbar, die sie hervor bringen und in Stand halten. Und da sie bereits immer schon interpretiert sind, be-deuten Worte, Handlungen, Dinge, Gesten in der sozialen Welt von sich aus etwas und bieten sich für solche Interpretationen an. Soziale Symboliken sind in ihrer Anzahl, Hervorgehobenheit und praktischen Anerkanntheit von ungeheurer Präsenz und Wirksamkeit: Personen sind von Struktur-Vermögenssymbolen bzw. -symboliken umstellt; sie können sich ihnen unmöglich entziehen. Und damit gelangt die vorliegende Darstellung zur dritten und letzten Komponente der grundlegenden Konstitutionsdynamik des Sozialen, zur symbolischen Reflexion oder reflexiven Symbolisierung.

7.3.1 „Unsichtbarkeit"/Veränderungsoffenheit des Sozialen als praktisches Grundproblem

Die Zukunfts- und Veränderungsoffenheit, die Variabilität des Sozialen, die prinzipielle Unbeobachtbarkeit aller erwarteten Momente des Sozialen erzwingt symbolische Reflexion.

Strukturelle Vermögen sind als solche sozial „unsichtbar", weil sie zum einen durch Erwartungen – also erwartetes zukünftiges, (noch) nicht verwirklichtes Verhalten – erzeugt werden, und zum zweiten durch praktische Anerkennungen, die selbst *verschwiegen* prozessieren und nicht „direkt", sondern nur vermittelt über regelmäßiges Verhalten erkennbar werden (das gleiche gilt für die Kriterien bzw. Maßstäbe, nach denen sie „vergeben" wird).

[27] Für eingehendere Diskussionen dieses Aspekts sei nochmals auf (Langer, 2005, 2006) verwiesen.

[28] Wenn man „Symbole" ins Konkrete übersetzt, erscheint die gesellschaftliche Praxis halt so, wie sie uns erscheint: als ungeheure Ansammlung von Häusern, Automobilen, Maschinen, Kleidungsstücken, Geschlechteraccessoires, Hautfarben, Ämtern, Titeln, Preisschildern, Eheringen, Uniformen, Aktien ... Gesetzen, Satzungen, Verfahren, Vorschriften, Regeln, Verboten, Geboten, Instanzen, Autoritäten, Kontrolleuren ... und Personen, Gruppen, Organisationen etc., die sie benutzen, tragen, ausüben, bewachen, befolgen, weitergeben, kaufen, legitimieren, herzeigen ... usw.

Nur in ihrer Aktualisierung durch vollzogenes Verhalten und seine Auswirkungen werden strukturelle Vermögen bzw. soziale Vermögensstrukturen sozial beobachtbar; nur aus vollzogenem Verhalten kann auf die Vermögensstrukturen geschlossen werden, die „hinter" diesem Verhalten stehen. Da derartige Schlüsse auch fehlschlagen können, ist in die soziale Welt ein grundlegender Unsicherheitsfaktor eingebaut. Er kann für Praxis/Ordnungen existenzbedrohend werden: wenn sie sich grundlegend täuschen hinsichtlich bestehender Vermögensstrukturen resp. bezüglich der Verteilung struktureller Vermögen.

Die Entwicklungsoffenheit des Sozialen birgt immer das Risiko, dass Verhalten anders als erwartet ausfällt und eigenes Verhalten, das auf „falschen" Erwartungen beruhte, sich im Nachhinein als wertlos erweist, weil es erstens nicht die erwarteten Wirkungen erzeugt hat und zweitens an die nun tatsächlich eingetretenen überraschenden oder enttäuschenden Verhaltensregelmäßigkeiten nicht anschließen kann.

7.3.2 Soziale Orientierung durch Differenzreflexion und Vermögenssymbolisierung

Praxis/Ordnungen sind genötigt, zu prüfen, in welchem Ausmaß die strukturellen Vermögen auch tatsächlich vorhanden sind, und in welchem Ausmaß die tatsächlich so verteilt sind, wie sie sie (an)erkennen.[29] Sie prüfen also, in welchem Maß sie strukturelle Vermögen – also *erwartete* Verhaltensregelmäßigkeiten – in *tatsächlich eintretenden* Verhaltensregelmäßigkeiten niederschlagen. Anders gesagt: Sie prüfen die Differenz-Relation (durch die Transition relationieren in Abbildung 7.8) zwischen aktuell sich vollziehenden Verhaltensregelmäßigkeiten (modelliert durch die Stelle aktuelle VR in Abbildung 7.8) und strukturellen Vermögen (Stelle erwartete, generalisierte und praktisch zuerkannte VR),

Bei sehr großen Differenzen zwischen erwarteten und eintretenden Praktiken (zwischen strukturellen Vermögen und faktisch sich vollziehendem Verhalten) werden Praxis/Ordnungen handlungsunfähig; sie sind dann desorientiert und können nur zufällige, gewissermaßen sinn-lose trial-and-error-Verhaltensweisen zeigen und –Erwartungen bilden (dies entspricht im Modell in Abbildung 7.8 dem rechten Zweig). Hält dieser Zustand an, werden die in ihm befangenen Praxis/Ordnungen zerfallen bzw. zerstört.

Bei minimalen Differenzen sind erwartetes und eintretendes Verhalten deckungsgleich: das Vermögen realisiert sich regelmäßig in faktischem Verhalten. Praxis/Ordnungen reproduzieren konformes Verhalten und konfirmieren sich dadurch. Ihre stabilen strukturellen Vermögen werden intensiv praktisch anerkannt, *aber sie bleiben unsymbolisiert.* Es sind die in der Soziologie sprichwörtlichen allzu selbstverständlichen Selbstverständlichkeiten, die nicht mehr reflektiert werden – die zweite Natur, die als völlig „normal" bzw. „natürlich" erscheint.

[29] Wenn ein Akteur meint, er habe sich über einen Gegenstand getäuscht und sehe jetzt seine „wahre" Gestalt, dann heißt das lediglich, dass er durch eine neue Perspektive auf den Gegenstand Qualitäten an ihm anerkennt, die er bisher übersehen hatte. Dazu muss er die Perspektive einnehmen (erzählen lassen, erfahren, beobachten, investigativ enthüllen etc.) was Zeit braucht. „Wahrheit hat notwendig einen Zeitkern." (Klauß 1989: 74)

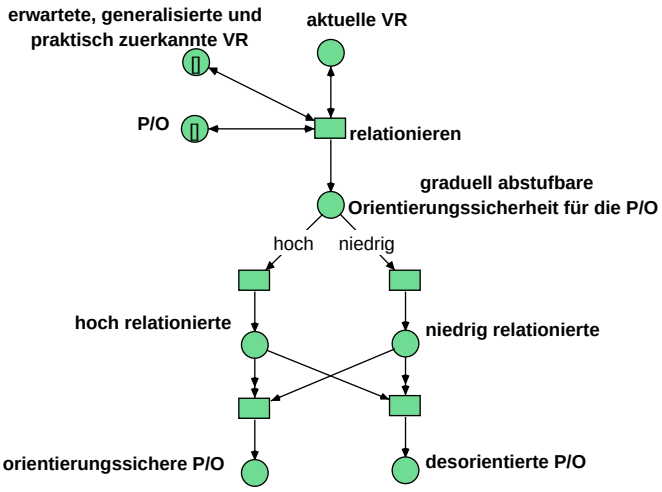


Abbildung 7.8: Orientieren

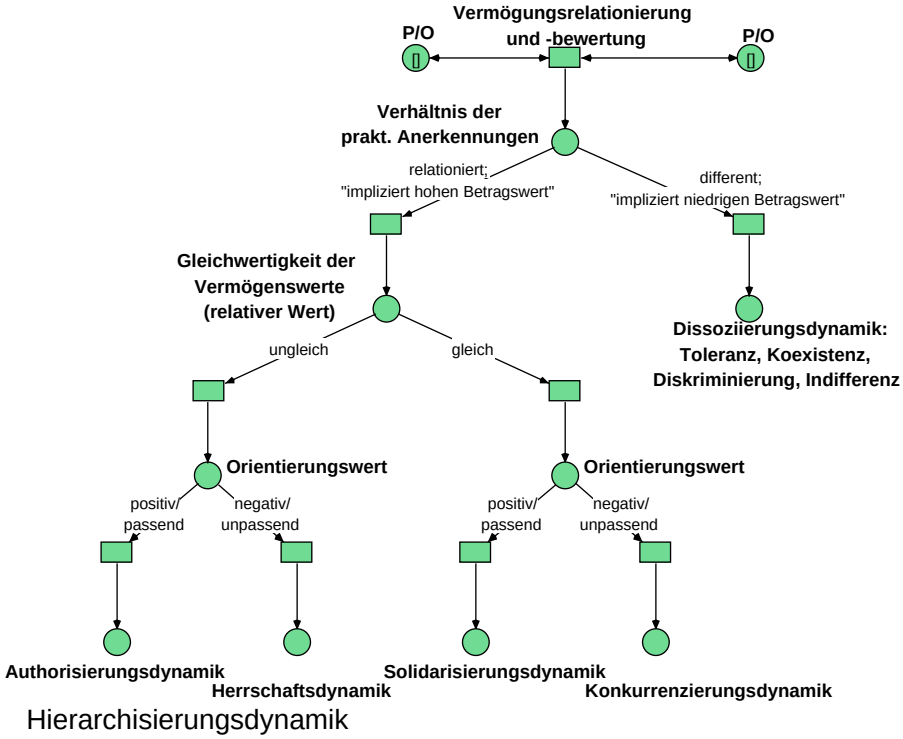


Abbildung 7.9: Konstitution der Strukturdynamik

Treffen Praxis/Ordnungen aufeinander, so ergeben sich in Abhängigkeit der wechselseitigen Relationierung der Vermögen unterschiedliche Dynamiken (vgl. dazu Abbildung 7.9): Sind die Vermögen different, so ergibt sich eine Dissozierungsdynamik, die auf Tolerierung und Koexisteny der Praxis/Ordnungen zielt. Sind die Vermögen dagegen relationiert, so ist zu unterscheiden, inwieweit die Vermögenswerte gleichwertig sind und inwieweit sie an einader orientiert sind. Gleichwertige Vermögen münden in Solidariserung- oder in Konkurrenzdynamiken – abhängig vom dem Orientierungswert. Ungleiche Vermögen führen zu einer Hierarchisierungdynamik, entweder als Athorisierungs- oder als Herrschaftsdynamik.

Treten Differenzen zwischen erwarteten und eintretenden Praktiken auf und werden diese von Praxis/Ordnungen praktisch anerkannt – m. a. W., haben diese Differenzen eine relevante verändernde Auswirkung auf das bisherige Verhalten der Praxis/Ordnung – dann tritt die Praxis/Ordnung in ein reflexives Verhältnis zu sich (samt ihren Beziehungen zu den „abweichenden" aktuellen Praktiken) ein.[30] Dies reflexive Verhältnis beginnt mit einer Überraschung oder einer Enttäuschung angesichts der Entdeckung (Anerkennung) jener Differenz, die für die Praxis/Ordnung immer eine partielle Desorientierung bedeutet, eine mehr oder weniger große Krise: Sie „weiß nicht, was sie tun soll".

Ihr Ausweg aus dieser erlittenen graduellen Unbestimmtheit und Unberechenbarkeit der sozialen Welt besteht darin, künftiges erwartetes Verhalten (also strukturelles Vermögen) sicherer zu machen (die Erwartungssicherheit zu steigern), und dies „Versichern" läuft über eine zusätzliche Hervorhebungs- und Darstellungsarbeit: die Symbolisierung.

Um etwas zu symbolisieren müssen sich möglichst viele Praxis/Ordnungen (vgl. dazu die gleichnamige Stelle in Abbildung 7.10) zusammen finden und interne Öffentlichkeit herstellen. Öffentlich heben sie dann besonders stabile Verhaltens/Erwartens-Konstellationen[31] hervor, etwa durch exemplarisches Aus-

[30] Joas betont ganz ähnlich, dass als Kriterium für die Gültigkeit von Erwartungen ein praktisches Zurechtkommen mit der Wirklichkeit ausreiche. Erst wenn Handlungsprobleme auftauchen, „kommt es punktuell zu einer Präzisierung der Erwartungen und der Wahrnehmungen, nicht aber zu einer völligen Umstellung". (Joas, 1992, 234) Genauso sieht es Bourdieu, wie ich, Roman Langer, in (Köhler u. a., 2003a, 135) zusammenfassend darstellte: „Generell setzt ein Nachdenken über das eigene Handeln, ein Bewusstwerden über die wirklichen Verhältnisse nur in Ausnahmefällen, Grenzsituationen und Krisenzeiten ein: nämlich wenn die Automatismen des Handelns (Routinen, rituelle Praktiken und habituelle Verhaltensweisen) versagen, wenn der praktische Sinn an einem auftauchenden Problem scheitert. In diesem Fall stellen Akteure explizite Verhaltensgrundsätze, Urteilskriterien und Wahrnehmungsregeln auf, bewusst stellen sie Berechnungen an und ziehen daraus Schlussfolgerungen. Das tun sie allerdings nur so lange, bis sie ein praktikables Ergebnis erreicht haben. Akteure können sich aber auch entscheiden, das unreflektierte Einverständnis mit ihrem Feld, die Zustimmung zu seinen Verhältnissen und Gegebenheiten zurückzunehmen und stattdessen genau diese Verhältnisse und Gegebenheiten nachdrücklich zu formulieren" – sprich sprachlich zu symbolisieren.

[31] Stabile Verhaltens-Erwartens-Konstellationen sind zum einen solche, die Erwartungen bei variierendem faktischen Verhalten konstant halten („normative Erwartungen" im Sinne Luhmanns; klassische Fälle sind moralische Normen und juristische Gesetze, aber auch bspw. die Inhalte der Lehrbücher empirischer Sozialforschung), zum anderen solche, die mit sehr großer Reichweite kollektiv geteilt werden und gelten (weshalb sie auch gern als Argument zur Begründung anderer Normen benutzt werden (Klein, 1985) und von Füh-

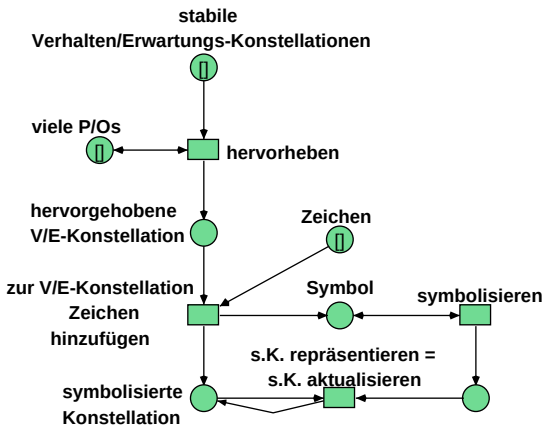


Abbildung 7.10: Symbolisieren stabiler V/E-Konstellationen

sprechen, (Vor-)Spielen, Anzeigen oder Vollziehen des Verhaltens. Im Wege dieses Demonstrierens fügen sie ihnen Zeichen hinzu (modelliert durch die Transition zur V/E-Konstellation Zeichen hinzufügen in Abbildung 7.10), etwa Worte, mit denen die V/E-Konstellation (bzw. das Vermögen) bezeichnet wird, Dinge, die das Vermögen darstellen, und ritualisierte Verhaltensweisen, die die Verfügung über das Vermögen demonstrieren. Damit formulieren und präsentieren sie diese Verhaltensregelmäßigkeiten etc. als besonders wichtige, bedeutsame und beachtenswerte. Es ergibt sich eine hervorgehobene V/E-Konstellation.

Das Sprechen der Worte, das Zeigen der Dinge und das Durchführen der Rituale wird dann durch Konvention zu unabtrennbaren Komponenten des symbolisierten sozialen Gegenstandes: das Symbol aktualisiert und repräsentiert Erwartungen und Verhaltensregelmäßigkeiten. Das bedeutet: Symbole *stellen die Präsenz dessen her*, was sie verkörpern.[32] Sie sind *und* bewirken, was sie bezeichnen (im Gegensatz zum Zeichen, das nur darauf verweist). Jeder symbolische Akt stellt das Symbolisierte erneut zur Schau – re-präsentiert es – und verwirklicht es erneut – re-stituiert es. Symbole verweisen also auf ein Potenzial und sind zugleich seine Aktualisierungen (modelliert durch die Transition symbolisierte Konstellation repräsentieren = symbolisierte Konstellation aktualisieren in Abbildung 7.10).

Relationieren und Symboliseren sind somit untrennbare Prozesse, was in in dem Übersichtsmodell in Abbildung. 7.11 zum Ausruck kommt. Das Modell ergibt sich als Kombination der Modelle aus Abb. 7.8 und 7.10, indem wir die Stelle Orientierungssicherheit für die P/O mit der Stelle stabile V/E-Konstellation identifizieren, was somit einer Symbolisierung im Falle hoher Orientierungssicherheit beschreibt.

rungsspitzen eines Kollektivs in besonderer Weise berücksichtigt werden müssen (Homans, 1960; Hollander, 1960)).

[32] Dies ist m. E. eine der überaus zahlreichen Stellen der vorliegenden integrativen Theorie, in der sich die Einbeziehung weiterer Theorien geradezu aufdrängt. Hier liegt eine systematische Anschlussstelle für Alfred Schütz' Arbeiten zu sozialem Sinn und sozialer Symbolik, vgl. stellvertretend etwa (Schütz und Luckmann, 1990, 195-200)

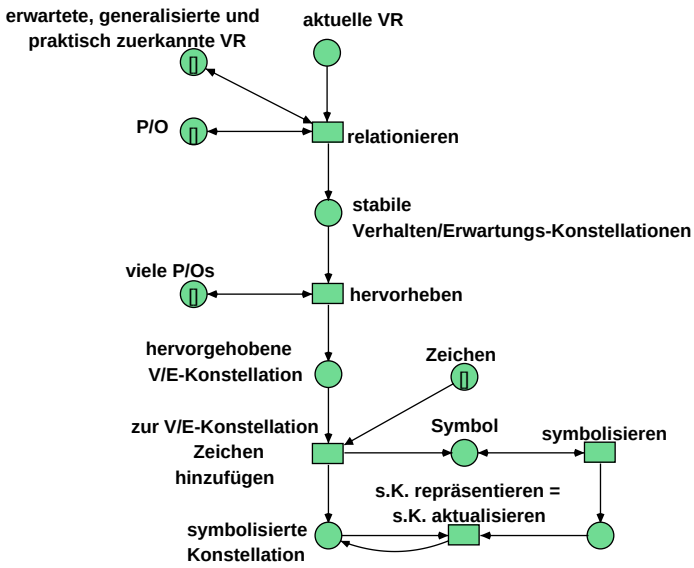


Abbildung 7.11: Reflexives Symbolisieren/symbolische Reflexion

Beispiele. (1) Jedes einzelne Gerichtsurteil ist (verkörpert) und restituiert (erzeugt noch einmal wieder) Recht; ebenso restituiert jede Verleihung eines Bildungstitels das Bildungssystem und ist sein Bestandteil. (2) Eine Sozialität, die sich in Name, Flagge, Sprache, Territorialgrenze, Hymne und ihren insignientragenden personalen Repräsentanten, etwa Regierungsmitgliedern, als Nation zur Schau stellt, stellt sich genau dadurch als solche immer wieder her und deutet sich als solche. (3) „Ich bin Ärztin, lassen Sie mich durch“ sagt die bei einem Unfall zufällig anwesende Frau und zeigt im Zweifel vielleicht einen entsprechenden Ausweis; wenig später treffen, durch Blaulicht und Sirene angekündigt, Rettungs- und Streifenwagen ein: der Ärztin wird allein auf Grund ihrer symbolisierenden Berufsbezeichnung, den Unfallsanitätern und Polizisten werden auf Grund der Symbolik ihrer Wagen und Uniformen bestimmte Verhaltensrechte und -kompetenzen eingeräumt. Die Ärztin verarztet, die Polizisten sperren den Unfallort, nehmen Personalien auf, die Sanitäter lösen die Ärztin ab – und vollziehen damit zugleich Gesundheits-, Bildungs- und Rechtssystem mit.

7.3.3 Stabilisierung und zeiträumliche Erweiterung der Sozialwelt durch Symbolisierung

Die soziale Funktion reflexiver Symbolisierung besteht demnach darin, bestimmte Vermögen/Strukturen weiter zu bekräftigen und zu verfestigen. Praxis/Ordnungen erkennen dabei im Übrigen besonders jene stabilen Regelmäßigkeiten des Verhaltens und Erwartens an, von denen sie erwarten bzw. an denen sie anerkennen, dass sie selbst von ihnen in besonderem Maße stabilisiert und aufgewertet werden. Diese stabilen Strukturen werden den Praxis/Ordnungen

damit lieb und teuer; sie interessieren sich für ihren Erhalt und Fortbestand, sie trachten danach und tragen so dazu bei, sie zu reproduzieren.[33]

Symbolisierung trägt so zur Sicherung des dauerhaften Bestandes bzw. der stabilen Reproduktion der symbolisch ausgezeichneten erwarteten Verhaltensregelmäßigkeiten bei – also auch zur Stabilisierung sozialer Vermögensstrukturen (samt Gewinnen/Profiten der durch sie Privilegierten). Denn zum einen wird nun Legitimation möglich: In der tätigen Verwendung von Symbolen wird „der interne gegenseitige Anerkennungsprozess" einer Praxis/Ordnung „sichtbar, beobachtbar ..: etwa im demonstrativen Zeremoniell der Privilegierten, das die Legitimität vorspielt, in einem darstellenden Verhalten versinnbildlicht (Grußformen, Kleidung, Anerkennungsgesten mit ihrer vor-bildlichen Wirkung)." (Popitz 1999: 15) Diese Demonstration symbolisiert nun die vorher rein interne Erwartung an Außenstehende, das intern von den Privilegierten Anerkannte ebenfalls (und möglichst zustimmend) anzuerkennen und damit zu legitimieren.

Dies ist der erste Schritt zu einem Generalisierungs- und Intensivierungsprozess der Anerkennung, dessen Abschluss durch die gleichförmige, routinierte Verwendung etablierter und scheinbar akteurs- wie kontextunabhängiger Symbole bildet. Die Symbole fungieren als übertragbare Blanko-Anerkennungen, und die Träger der symbolisierten Verhaltensregelmäßigkeiten können wechseln.[34] Dies ist der Effekt des Sachverhaltes, dass sich in einer symbolisierten Sozialwelt der Zugriff der Praxis/Ordnungen über die aktuell sich vollziehende Gegenwart hinaus in die Vergangenheit und die Zukunft erweitert, und sich über den Ort der aktuellen Anwesenheit hinaus auf weit entfernte Orte ausdehnt.

Praxis/Ordnungen können einander fortan mitteilen, welches Verhalten sie selbst vollziehen könnten oder zu vollziehen beabsichtigen, ohne es vollständig zu vollziehen oder bevor sie es vollziehen, und welches Verhalten sie von anderen Akteuren (nicht) erwarten, damit die anderen ihr Verhalten darauf einstellen (können), und sie beobachten und bewerten, welche Erwartungen und Vermögen andere Akteure symbolisch mitteilen, um ihr eigenes Verhalten und ihre Erwartungen darauf einstellen zu können. Damit geben Praxis/Ordnungen einander Gelegenheit, sich bereits im Vorwege an ihrem zukünftigen bzw. möglichen Verhalten und über Möglichkeiten, Fähigkeiten, Bereitschaften und Erwartungen

[33] Personen lernen solche Anerkennungsregelmäßigkeiten zunächst immer in den Praxis/Ordnungen kennen, in die sie hinein geboren sind; später dann zusätzlich in allen, die ihre Existenz und Anerkanntheit sichern und reproduzieren bzw. womöglich sogar steigern – von denen sie also profitieren und privilegiert werden. Die relative Stabilität der Sozialformation „Nationalstaat" dürfte u. a. daran liegen, dass er als Einheit von Gleichgeborenen verstanden wird. Im Begriff der Nation klingt das Geborenwerden (lat. *nasci*) als verbindendes Moment noch an.

[34] Ähnlich wie die nach Marx fetischisierten Waren scheinen auch die Symbole selbst in Beziehung zueinander zu stehen und Werte-an-sich zu haben.

zu orientieren.[35] Sind soziale Gegenstände reflexiv symbolisiert, dann sind sie für Praxis/Ordnungen besser beobachtbar und erwartbar: berechenbarer.

7.3.4 Die Ordnungs- und Orientierungsfunktion der Symbolisierung

Darüber hinaus erfüllt reflexive Symbolisierung eine Ordnungsfunktion. Sie regelt soziale Zugehörigkeiten und Grenzen, typisiert und umgrenzt die komplexe Praxis als mehr oder minder standardisierte „Verfahren", „Fällen", „Vorgängen", „Tatbeständen", „Normen", „Regeln" etc. Vermögenssymbole fungieren also als stabilisierende Gliederungseinheiten sozialer Wirklichkeit. Denn die Verwendung von Vermögenssymbolen wirkt sozial trennend *und* vereinigend; in ihr werden soziale Unterschiede und Identitäten sozial sichtbar. So können Akteure an der Verteilungsordnung der Vermögenssymbole und der Einschätzung der relativen Vermögenswerte ihrer Koakteure Unterschiede, Positionen und Ränge im sozialen Raum erkennen – und sich damit auch über „ihre" angestrebten Positionen sowie über ihren aktuellen Ort und Rang im System sozialer Vermögensverhältnisse orientieren, um sich im sozialen Gefüge zuzuordnen.

Soziales Orientieren bedeutet im hier vorgeschlagenen Verständnis: durch reflexiven Abgleich erwarteter und tatsächlicher Praxis bestimmen, welches Verhalten von wem wann auszuüben ist und welches nicht.[36] Je größer die Menge solcher Deckungsgleichheiten ist, je mehr Erwartungen also zutreffen und je genauer sie zutreffen, desto *orientierungssicherer* ist die Praxis/Ordnung, desto sicherer „weiß" sie, was sie tun kann/darf/soll, um Vorteile zu erringen und Nachteile zu vermeiden. Orientierungssicherheit ist hier als eine subjektive Größe gefasst, d.h. es ist eine Einschätzung (Erwartung) der Praxis/Ordnung über ihre Orientiertheit, sprich das Ausmaß des Zutreffens ihrer Erwartungen auf die real sich vollziehende Praxis. Orientierungssicher sind Praxis/Ordnungen mithin, wenn sie sicher wissen, „was sie und was andere tun dürfen und tun müssen; wenn sie eine Gewissheit entwickeln können, dass sich alle Beteiligten mit einiger Verlässlichkeit auch wirklich so verhalten, wie es von ihnen erwartet wird; wenn sie damit rechnen können, dass Übertretungen in der Regel bestraft werden; wenn sie voraussehen können, was man tun muss, um Vorteile zu erringen, Anerkennung zu finden. Man muss mit einem Wort wissen, woran man ist." (Popitz 1976: 34)

Symbolisierung ist das reflexive Moment des Sozialen: Erwartungen reflektieren Praktiken *et vice versa*, und soziale Praxis/Ordnungen beziehen sich auf bestimmte Teile ihrer selbst bzw. der sozialen Wirklichkeit, in der sie existieren.

Allerdings wird nur ein relativ geringer Teil der wirklich vorhandenen sozialen

[35] Reflexive Symbolisierung ist mithin der erste bzw. grundlegende Prozess von sozialer Selbstregulierung bzw. Selbststeuerung bzw. Selbstordnung. Will eine Praxis/Ordnung die Wirksamkeit ihres Verhaltens sicher stellen oder erhöhen bzw. will sie das Risiko minimieren, passiv dem „Be-handeltwerden" ausgeliefert zu sein, dann kann sie *gezielt* kund geben, was sie hervorhebt, wie sie es deutet und bewertet, was sie erwartet, wozu sie bereit ist und was sie selbst zu tun gedenkt. Sie kann beabsichtigtes Verhalten und ihre mögliche soziale Wirksamkeit (ihre „Macht") signalisieren oder andeuten.

[36] Begriffsgeschichtlich bedeutet Orientieren „die Himmelsrichtung nach der aufgehenden Sonne (sol oriens) bestimmen".

Welt symbolvermittelt reflektiert bzw. symbolisiert, der Löwenanteil dagegen bleibt unsymbolisiert und unreflektiert – wenngleich praktisch anerkannt.

Soziale Symboliken sind Selbststrukturierungsinstrumente. Und sie entwickeln Motivation und Interesse daran, dass die Vermögenssymbole verwendet – Normen/Regeln durchgesetzt und nicht gebrochen, Geschichts- und Ordnungsdeutungen geglaubt, Orientierungsinstanzen anerkannt und nicht desavouiert – werden, um keine Orientierungsverluste zu erleiden, die meistens mit Anerkennungs- und Vermögensverlusten einher gehen.

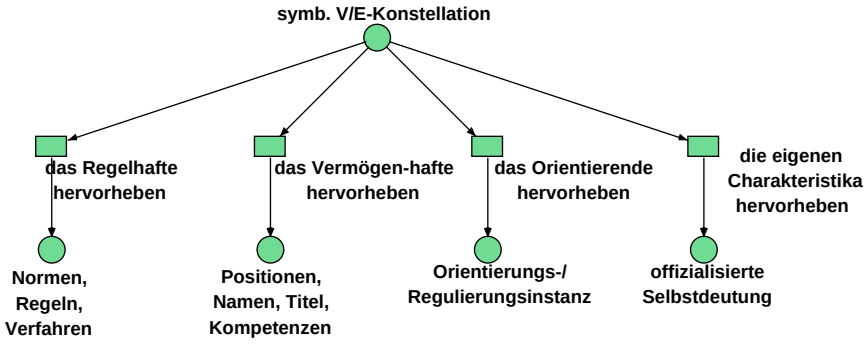


Abbildung 7.12: Ausgebildete reflexive Symboliken

Symbolisierungen des Sozialen münden in drei typische Formen reflexiver Symbolik (vgl. dazu Abbildung 7.12): (1) Die Symbolik erwarteten Verhaltens: Normen, Regeln und Verfahren sowie die Symbolik sozialen Vermögens: Positionen, Namen und Titel; (2) darunter speziell die Symbolik einer internen Selbst-Repräsentanz der Praxis/Ordnung: Orientierungsinstanzen, und (3) die Selbstbeschreibungssymbolik einer Praxis/Ordnung: die offizialisierte Selbstdeutung. – Diese drei typischen reflexiven Symboliken des Sozialen werden in den folgenden drei Abschnitten näher bestimmt.

7.3.5 Normen, Regeln, Verfahren – Positionen, Namen, Titel

Weit verbreitet ist die Symbolisierung von Erwartungen an soziale Beziehungen und ihre Gestaltung. Symbolisierung von Erwartungen an Beziehungen, sprich Verhaltensregelmäßigkeiten, ist das, was gemeinhin als „Normierung“, „Regulierung“, „Prozeduralisierung“ oder „Ritualisierung“ bezeichnet wird. Es handelt sich dabei um Verhaltensregelmäßigkeiten, deren Ausübung offizialisiert, und deshalb auch schriftlich formuliert oder zumindest in festen Vorstellungsbildern (materialisiert u.a. in durchgeführten Ritualen wie z. B. eines Justizverfahrens) und Sprachphrasen fest gelegt („formalisiert“) wird: diese Verhaltensregelmäßigkeiten werden sozial explizit erwartet – und verhalten sich zu impliziten Erwartungen etwa so wie das offizielle zum *hidden curriculum*.[37]

[37] Die Begriffe „Norm“ und „Regel“ heben hervor, dass eine Verhaltensregelmäßigkeit *erwartet* wird, „Verfahren“ und „Ritual“ dagegen betonen mehr die Routinisierung und strikte Einhaltung der Verhaltensregelmäßigkeit in der Praxis.

Zwar kann jede Beziehung normiert/reguliert/in Verfahrensform gegossen werden (und denkt man an die ungeheure Zahl von Gesetzen, Vorschriften, Statuten, Regelwerken bzw. administrativen und juristischen Verfahren etc., dann hat man den Eindruck, das passiert auch). In erster Linie werden aber solche Verhaltensregelmäßigkeiten normiert, die für die Reproduktion einer Praxis/Ordnung erstens als zentral bedeutsam und zweitens als gefährdet oder gefährdungsanfällig und deshalb schutzbedürftig gelten.

Wie alle Symbole existieren („gelten“) auch Normen, Regeln, Verfahren und Rituale nur so lange und nur dort, wie bzw. wo sie praktisch anerkannt werden, indem Akteure ihr Verhalten an ihnen orientieren; wie alle Symbole dienen sie als Orientierungspunkte für Praxis/Ordnungen. Orientieren heißt nicht befolgen: Der Grad der Normgeltung bzw. -befolgung variiert.[38] Normen werden durchaus übertreten und interpretiert, Verfahren abgekürzt, umgangen oder gedehnt. Sind sie aber einmal etabliert, gelten sie relativ unabhängig von Art und Häufigkeit „abweichenden“ Verhaltens: die Erwartung bleibt stabil, sie ist gewissermaßen „fehlertolerant“.

Norm- bzw. verfahrenskonforme Akte werden – wie die Verwendung von Vermögenssymbolen im allgemeinen – nicht prämiert, sondern als normal erwartet und schlicht vorausgesetzt. (Explizite Belohnungen beziehen sich nicht auf „normale“, sondern eben auf „besondere“ Tätigkeiten bzw. Leistungen.) Die Generalbelohnung für Konformität und Symbolverwendung besteht einfach in der Gewährung von Zugehörigkeit und Teilhabe an der gesellschaftlichen Praxis/Ordnung, die durch das praktische Befolgen der Normen/Regeln und das Verwenden der Symbole stabilisiert und mitreproduziert wird.

Für die Abweichung von Normen und Verfahren sind in der Regel ihrerseits symbolisierte, normierte und offizialisierte Anerkennungen vorgesehen: Sanktionen. Sanktionen sind „Reaktionen, die mit *der Intention der Erkennbarkeit* für den Betroffenen als negative“ (strafende, schädigende) oder positive (lobende, förderliche) „Antwort auf ein bestimmtes Verhalten vollzogen werden.“ (Popitz 1980: 29) Sanktionen bekräftigen die Verhaltensregelmäßigkeiten, von denen ein bestimmtes Verhalten negativ oder positiv abweicht, indem sie es gezielt, ausdrücklich und erkennbar missbilligen und ablehnen bzw. bestätigen und bestärken. Wer sanktioniert, muss also dem zu sanktionierenden Akteur zu erkennen geben, (a) auf welches bestimmte Verhalten sich die Sanktion negierend oder konfirmierend bezieht, und (b) dass er ihn sanktioniert – wobei weder der Sanktionierende sich dabei als solcher zu erkennen geben noch der Sanktionierte die Sanktion als solche zu empfinden braucht.

Offizialisierte Sanktionen sind in der Regel Umverteilungen strukturellen Vermögens. Sie greifen nicht in die Anerkennungsprozesse ein, die Vermögen erzeugen, sondern entziehen oder gewähren (verleihen) Symbole. Ihre Wirksamkeit und Regelungskraft sozialer Sanktionen geht aber letztlich darauf zurück, dass prinzipiell jeder Akteur die Fähigkeit besitzt, Anerkennung zu entziehen.[39]

[38] „Die Norm gilt in dem Grade, in dem sie eingehalten oder durch Sanktionen bekräftigt wird.“ (Popitz 1980: 3) Normen gelten in per definitionem *normrelevanten* Situationen; in definierten Ausnahmesituationen ist außerordentliches Verhalten erlaubt.

[39] „Verletzungsmächtigkeit, Verletzungsoffenheit bestimmen wesentlich mit, was wir in einem fundamentalen Sinne ‚Vergesellschaftung' nennen. Die Sorge, Furcht, Angst voreinander

Nicht jede einzelne Abweichung zieht eine Sanktion nach sich. Aber Abweichen *riskiert* bzw. *ermöglicht* Sanktionen. Insofern determinieren Normen und Verfahren tatsächliches Verhalten nicht, aber sie orientieren es: sie dienen als Hervorhebungs- und Bewertungsmaßstäbe für Verhalten.

Positionen (Plätze, Stellen) sind strukturelle Vermögen, die (a) ihren Inhaber in die Lage versetzen, einen bestimmten sozialen Bedarf an allgemein erwarteten, als benötigt oder nötig erscheinenden Leistungen zu erbringen bzw. Aufgaben zu erfüllen, und (b) nicht an Akteure, sondern an einen stationären Standpunkt, eine Stelle in der sozialen Welt gebunden sind und auch bei Vakanz, d.h. ohne Verbindung zu vermögensaktualisierenden (z. B. ein Amt ausübenden) Akteuren, bestehen bleiben. Positionalisierte Vermögensstrukturen werden gewissermaßen als reine Erwartungen an einer Stelle der sozialen Welt gelagert und durch Nachfolge-Regelungen von Inhaber zu Inhaber übertragen.

Titel und*Namen* sind gewissermaßen die komplementäre ambulante Variante von Positionen. Sie verleihen das Recht bzw. die Pflicht, bestimmte soziale Positionen einzunehmen. Die Praxis/Ordnung erwartet und erlaubt die Ausübung der Praktiken, die an Positionen, Titel und Namen gebunden sind, nur (von) den Verfügenden (Inhabern, Trägern), (von) allen anderen nicht. Scheiden Inhaber aus der Position aus, so verlieren sie auch das mit ihr verbundene strukturelle Vermögen.

7.3.6 Symbolische Selbstrepräsentanz: Orientierungsinstanzen

In jeder sozialen Praxis/Ordnung gibt es eine Klasse von Positionen, die von besonderem Wert sind: Orientierungsinstanzen.[40] Orientierungsinstanzen sind Positionen, deren Inhaber stellvertretend für die gesamte Praxis/Ordnung spezifische, meist Steuerungs-, Regulierungs- und Koordinierungsaufgaben zu erfüllen bzw. -leistungen zu erbringen haben und in dieser Funktion die gesamte Praxis/Ordnung repräsentieren.

Gemeinhin identifizieren Akteure Praxis/Ordnungen mit ihren Orientierungsinstanzen, die deshalb auch „Stellvertreterinstanzen“ genannt werden können: Praxis/Ordnungen werden an von ihren Orientierungsinstanzen vertreten. Allgemeiner formuliert: Praxis/Ordnungen erkennen und anerkennen einander an Hand ihrer stellvertretenden Orientierungsinstanzen.

In diesem Sinne werden Organisationen, Gruppen, Gesellschaften in der sozialen Praxis auch und gerade von ihren Mitgliedern so behandelt, als ob sie Akteure wären, gewissermaßen als Real-Akteurfiktionen (Schimank 1988), ungeachtet

ist als ein Modus des Vergesellschaftet-Seins niemals ganz wegzudenken. Zusammenleben heißt stets auch sich fürchten und sich schützen.“ (Popitz 1999: 44)

[40] Dieser Begriff ging hervor aus der Analyse der Bestimmungen von Machtmonopol-Gruppen, Über-Ich, Gewissen, Ausübende von Fremd- und Selbstzwängen (Elias), Autoritäten, Sanktionsinstanzen, Machtpositionen und Solidaritätskernen (Popitz) sowie Geschmack, praktischer Sinn und Habitus (Bourdieu). Die analytische Kernfragestellung war dabei: wer „leitet“ das Verhalten von Akteuren? Und zwar hier zunächst unabhängig vom Mischungsgrad zwischen Freiwilligkeit und Zwang. Weitere Ansatzpunkte böten der theoretischen Analyse hier u.a. Meads „Self“: „Das so entstehende Self ist dann eine Instanz zur einheitlichen Selbstbewertung und Handlungsorientierung.“ (Joas, 1992, 275) unter Bezug auf Mead). Auch politologische Steuerungstheorien und sozialpsychologische Forschungen über Führer und Führung wären hier zu konsultieren.

dessen, dass sie intern differenziert und interesseninkonsistent, von Konfliktlinien durchfurcht sind, vielleicht gar von mehreren, untereinander zerstrittenen Stellvertreterinstanzen repräsentiert werden.

Es ist also zwar nicht „die" Praxis/Ordnung als einheitliches Subjekt, die etwas mit „ihren" Akteuren bzw. Sub-Praxis/Ordnungen „tut", sondern vielmehr die ungezählten kommunizierenden Aktivitäten und Rezeptivitäten, durch die Akteure bzw. Sub-Praxis/Ordnungen aneinander und an sich selbst Aneignungs- und Prägungsarbeit (also: Strukturierung) leisten.

Die Orientierungsinstanzen übernehmen, wie angedeutet, Organisationsfunktionen. Sie sorgen (vielfach per Delegation) für Koordination, Normierung, Sanktionierung und Steuerung „ihrer" Praxis/Ordnung bzw., je nach Funktion, bestimmter Teile oder Elemente der Praxis/Ordnung. Sub-Praxis/Ordnungen (zugehörige Akteure) anerkennen die Orientierungsinstanzen praktisch, indem sie ihr Verhalten am Verhalten jener Instanzen orientieren. Mittels ihrer Orientierungsinstanz(en) reflektieren, betrachten und beurteilen Praxis/Ordnungen sich bzw. ihr Verhalten selbst, und machen sich auf diese Weise zum Objekt ihres eigenen Verhaltens. Praxis/Ordnungen differenzieren sich damit intern, sie nehmen „ein Verhältnis zu sich selbst" (Popitz 1976: 34) ein.

Orientierungsinstanzen funktionieren gleichsam „automatisch" (Elias, 1976, 398). Die Praxis/Ordnung bedient sich ihrer, wenn sie einmal fest eingerichtet sind, absichtslos bzw. nichtintentional. Orientierungsinstanzen können daher als Ort und Hort bestands- bzw. reproduktionsrelevanter *tacit* und *practical knowledge* bzw. besser *intelligence* der Praxis/Ordnung über ihre Stellung zur Welt gelten. Sie deuten und entziffern Situationen und Praktiken auf eine ihnen und der Praxis/Ordnung nahezu selbstverständlich erscheinenden Weise und sind so dafür verantwortlich, dass Akteuren alles, was in ihrer gewohnten Praxis/Ordnung prozessiert, sinnvoll erscheint, „d.h. sinnerfüllt und objektiv in eine vernünftige Richtung weisend." (Bourdieu, 1993, 122)

Orientierungsinstanzen regulieren das Verhalten und das Erwarten der Praxis/Ordnung insbesondere hinsichtlich der Interpretation der Welt (Traditionsauslegung, Rechtsprechung) und der Handlungsorganisation ihrer Praxis/Ordnung. Diese ihre Hauptfunktionen sind typische Herrschafts-Aufgaben. Zwar tragen alle Akteure bzw. Sub-Praxis/Ordnungen zur Regulierung und Steuerung des Verhaltens „ihrer" übergeordneten Praxis/Ordnung bei. Die Orientierungsinstanzen aber sind darauf spezialisiert, diese allgemeine Regulierung ihrerseits zu kontrollieren und zu steuern, sie stellen also funktional spezifizierte Organe der Selbstorganisation einer Praxis/Ordnung dar – und damit immer auch Ballungszentren sozialer Macht. Darüber hinaus sind sie dauerhaft institutionalisiert. Sie haben die Verfügungsgewalt über Orientierungsvermögen und einen Verhaltens-Erzwingungsstab monopolisiert. Sie sind der Teil der Praxis/Ordnungen, der höchstinstanzlich über die Regulierung allen internen Verhaltens bestimmt.[41]

[41] Die bekanntesten und wirksamsten formalen Orientierungsinstanzen westlicher, nationalstaatlich verfasster Gegenwartsgesellschaften sind: Organe politischer Gesetzgebung, juristisch-administrativer Ausführung und exekutiver Sanktionierung (samt Verleihung von Rechtstiteln, politischen Ämtern/Funktionen) sowie erzieherischer oder kultureller Bildung (samt Verleihung von Bildungstiteln, Ehrungen, Preisen, Zertifikaten). Alle Orientierungs-

7.3.7 Symbolische Selbstreflexion: Offizialisierte Selbstdeutung

Ein dritter Typ reflexiver Symbolik besteht darin, dass eine Praxis/Ordnung sich in Form von Erzählungen und Geschichte(n), Anekdoten und *stories*, Nachrichten und Interpretationen selbst beschreibt und deutet. Es handelt sich hierbei um diskursiv-symbolische Anerkennung, um den Teil der praktischen Anerkennung, der sich über Sprechverhalten und dessen Resultate bzw. Erzeugnisse, vor allem also Texte, mitteilt; ein Teil, der zur rein praktischen Anerkennung aber geradezu in Gegensatz treten kann – diskursiv-symbolische steht zur praktischen Anerkennung wie das Reden zum Handeln und wie das Interpretieren zum Verändern.[42]

Wie Normierungen und Orientierungsinstanzen sind Selbstdeutungen explizite Reflexionsformen der Praxis/Ordnung, die bestimmte Teile der Praxis/Ordnung nochmals hervorheben und befestigen. Sie dienen somit dem Re-Organisieren, Regulieren und Stabilisieren der Praxis/Ordnung. Und wer über die Geschichte(n) einer Praxis/Ordnung verfügt – sie schreibt, erzählt, zensiert, genehmigt – der verfügt über Vermögen, auf sie einwirken zu können (insofern übt eine Praxis/Ordnung, die an ihre offizialisierte Selbstdeutung glaubt, Macht über sich selbst aus): er beeinflusst Erwartungen, Hervorhebungen und die Weisen praktischen Anerkennens.

Unabhängig vom Inhalt dieser Geschichte(n) ziehen Sprache und Begriffe, in denen die Selbstdeutungen abgefasst sind, Grenzen zwischen dem, was sag- und denkbar ist, und dem, was undenkbar und unsagbar ist und daher nicht einmal als unmöglich erscheint, sondern *gar nicht erst erscheint*. Die Inhalte dann geben Interpretationen der Praxis/Ordnung über sich selbst, ihre internen Verhältnisse, ihre Beziehungen zu anderen Praxis/Ordnungen, ihre Stellung in der Welt usw. wieder.

Die offizialisierte Selbstdeutung ist somit halbblind: Sie vermeidet systematisch die Frage nach dem Daseinsgrund (Begründung, Sinn) der Praxis/Ordnung; sie verschweigt wesentliche Erzeugungs- und Reproduktionsprinzipien, die an ihren praktischen Regelmäßigkeiten ablesbar und in ihren Erwartungs- und Vermögensstrukturen verankert sind. Praxis/Ordnungen können ihre „Lebens-Spielregeln“, die grundlegenden Voraussetzungen und Prinzipien ihres Verhaltens, Erwartens, Vermögens, Bewertens und Symbolisierens nicht benennen, obwohl sie sicher nach ihnen handeln. Sie ahnen nicht, dass sie selbst die Verhältnisse hervor bringen, die sie als gegeben hinnehmen.

7.4 Die Konstitutionsdynamik im Überblick

Damit ist die Darstellung des grundlegenden Konstitutionsmechanismus des Sozialen abgeschlossen. Der Konstitutionsmechanismus kann zusammenfassend

instanzen arbeiten wesentlich mit ökonomischen Zahlungen und rechtlich-moralischen Normierungen.

[42] In diesem Zusammenhang wäre hier der Ansatzpunkt zur Einfügung der hervorragenden Reflexionen von Habermas (1992) über das Verhältnis zwischen sozialem Sein und Sollen bzw. zwischen „Faktizität und Geltung“ aus den ersten beiden Kapiteln seines gleichnamigen, wohl letzten noch soziologisch zu nennenden Buches.

beschrieben werden als praktische Anerkennung struktureller Vermögen, von denen einige reflexiv symbolisiert werden, oder als Ausbildung stabiler Vermögensstrukturen durch anerkennende Praxis und symbolische Reflexion (vgl. dazu die Skizze in Abbildung 7.13).

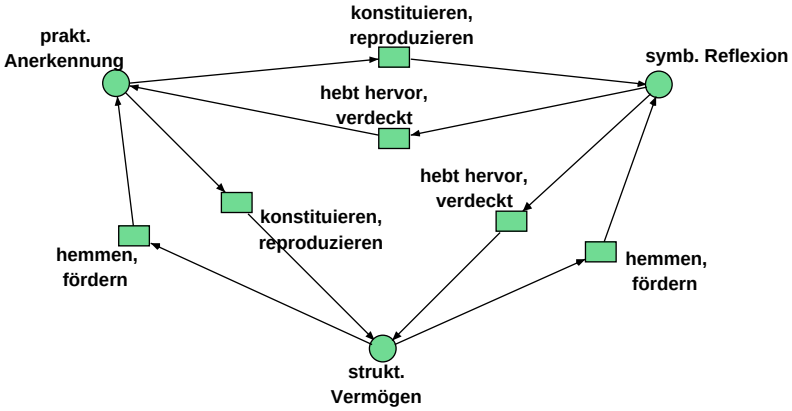


Abbildung 7.13: Schema: Konstitution strukturellen Vermögens und reflexiver Symbolik

Wir können in der Darstellung aber auch eine duale Sichtweise ein nehmen, denn die praktische Anerkenung ist nicht nur ein Objekt, osndern zugleich auch untrennbar mit dem Prozess des praktischen Anerkennens verbunden. Dualisieren wir in diesem Sinne die Beziehungen in Abbildung 7.13, so erhalten wir eine abstrakte Sichtweise der Konstitution.

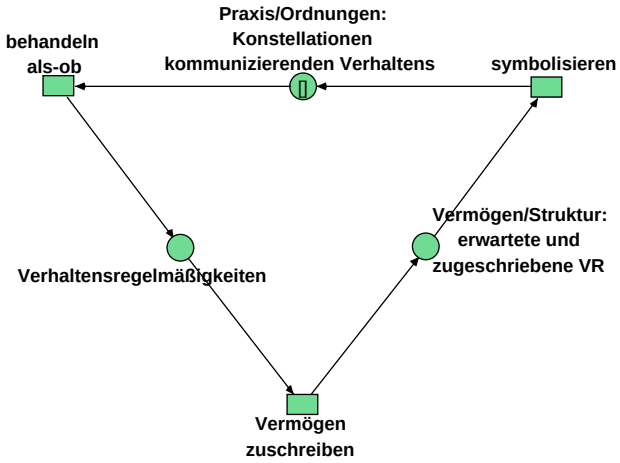


Abbildung 7.14: Konstitutionsdynamik, duale Sichtweise

Die drei Komponenten der Konstitutionsdynamik bedingen einander, d.h. sie ermöglichen und begrenzen wechselseitig ihre Ausprägungen.[43] Niedrige praktische Anerkennung lässt weder hohes Vermögen noch stabile Strukturen, weder

[43] Im Übrigen sind alle drei Komponenten in sich dialektisch strukturiert, insofern sie in Span-

Reflexion noch Symbolisierungen des kaum Anerkannten entstehen, hohe Anerkennung dagegen sichert Vermögensstrukturen und reflexive Symboliken.[44] Vermögensstrukturen bzw. strukturelle Vermögen wirken bedingend – also beschränkend und ermöglichend – sowohl auf die reflexive Symbolisierung als auch auf die praktische Anerkennung zurück, sie steigert bzw. mindert die Wahrscheinlichkeit bestimmter anerkennender und reflexiv-symbolischer Aktionen.

Die symbolische Reflexion (oder reflexive Symbolisierung) schließlich ordnet Vermögen/Strukturen einander zu bzw. grenzt sie voneinander ab, hebt einige hervor und vernachlässigt andere, wodurch sie ihren Wirksamkeits- und Stabilitätsgrad beeinflusst. Zu Anerkennungspraktiken verhält sich die symbolische Reflexion sowohl schützend – denn die *nicht* symbolisierten, nicht reflektierten Bereiche praktischer Anerkennung und des praktisch Anerkannten können ungehindert und quasi-natürlich prozessieren – als auch abschwächend oder verstärkend, weil die reflexiv symbolisierten Bereiche der Praxis/Ordnungen diesen selbst für gezielte Eingriffe zugänglich sind.

Diese Konstitutionsdynamik liegt jeder sozialen Praxis/Ordnung zu Grunde, sie erzeugt und erhält jede soziale Einheit – jeden Akteur, jede Gesellschaft, jede Beziehung usw. Sie ist eine sozial nicht beachtete, unterhalb geläufiger Wahrnehmungsschwellen angesiedelte Gemeinsamkeit aller noch so unterschiedlichen sozialen Erscheinungen: an der Konstitutionsdynamik einer Praxis/Ordnung wirken alle Praxis/Ordnungen, die zu ihr in Beziehung stehen, mit, unabhängig von ihren je spezifischen Bestrebungen und Einschätzungen, auch die ärgsten Feinde, die härtesten Konkurrenten, die völlig Anonymen, die von ihr sozial Verachteten. Sie alle sind gewissermaßen Kollaborateure im Untergrund des Sozialen, insofern sie alle an dieser unterschwelligen Konstitutionsdynamik, die das Soziale erst ermöglicht, gemeinsam mitwirken.

Die Konstitutionsdynamik ist also ein immerwirkender Praxisprozess in der sozialen Welt. Sie ist das erste und (verglichen mit anderen, speziellen) gewichtigste Strukturationsmuster[45] des Sozialen, das die vorliegende Arbeit zu

---

nungsfeldern zwischen einem eher aktiven (Verhalten, Vermögen, Reflexion) und einem eher rezeptiv-passiven (Anerkennung, Struktur, Symbolik) Pol oszillieren. Ein dialektisches Verhältnis bezeichnet hier (a) ein soziales Verhältnis in Form eines bipolaren Diskontinuums, das einen nur in der Praxis lokalisierbaren (!) vexierbildartigen Umschlagpunkt enthält, obwohl es (b) als stufenloses, skalenartiges Kontinuum (Maßverhältnis) interpretiert werden kann, dessen Pole aber (c) einander wieder berühren – jeder Pol trägt ein Minimum seines Gegenteils in sich, weil beide Pole sich durch wechselseitige Reflexion (Spiegelung) in einander vermitteln. Dieser pragmatische Begriff einer negativen Dialektik ist den Darlegungen in (Marcuse, 1989, 21-138) und (Adorno, 1990, 13-66; 137-208) entnommen.

[44] Martens (1997, 306-307) entwirft den Zusammenhang zwischen Anerkennung und Symbolik auf ähnliche Weise: Die Möglichkeit praktisch-operativer Verwendung von Symbolen und ihre akzeptanz- und aufmerksamkeitsfördernde Wirkung sei abhängig von ihrer globalgesellschaftlichen Akzeptanz.

[45] Strukturationsmuster, um es noch einmal in Erinnerung zu rufen, sind Verhaltensregelmäßigkeiten, mit denen soziale Einheiten typischerweise auf sich selbst einwirken, also ihre eigenen Strukturen systematisch stabilisieren, verändern oder unangetastet lassen. „Sozial allgemein“ heißt: Gesucht werden Strukturationsmuster, die öffentlich-rechtliche Bildungsinstitutionen zwar prägen und in ihnen reproduziert werden, die aber nicht als spezifische Merkmale von Bildungsinstitutionen (oder, noch spezieller, von Schulen und Universitäten) gelten können, sondern unabhängig von konkreten Organisationsformen gesellschaftsweit verbreitet sind.

rekonstruieren in der Lage war. *Nach dieser Konstitutionsdynamik, ihren Formungen und Ausprägungen, ihren konkreten Resultaten und Auswirkungen wird in den empirischen Fällen zu suchen sein.* Die Konstitutionsdynamiken von Praxis/Ordnungen könnten zu jenen sozialen Momente zählen, die sowohl in der strukturreformerischen und -entwickelnden Praxis in Bildungsinstitutionen als auch in den theoretischen Modellen, die jene Praxis zu beschreiben suchen, zu wenig beachtet werden. Wie sehen und wirken sich die Konstitutionsdynamiken in schulischen und universitären Selbstorganisationsprozessen aus? Das wird eine Leitfrage bei der Analyse der empirischen Fälle sein.

Doch die Konstitutionsdynamik ist nicht das einzige allgemeine Selbstorganisationsmuster, das die integrative Theorie aufzuweisen hat. Denn das Soziale ist ja in gewissem Sinne immer schon konstituiert, es weist dauerhafte Strukturen auf, von denen zahlreiche sich nur äußerst schleppend verändern, obwohl sie im Prinzip beständig rekonstituiert werden und damit eine ständige starke Veränderung zumindest denkmöglich wäre. Die festen Strukturen wirken wie Grenzen im Sozialen; das Soziale erscheint als aus lauter unterschiedlichen Gegenständen, Artefakten, Beziehungen, Gruppen, Gesellschaften, Personen, Symbolen usw. bestehend.

Die vorliegende theoretische Rekonstruktion begibt sich nun aus der bislang wenig erforschten Unterwelt des Sozialen stärker in Richtung Oberfläche, dorthin, wo jene sozialen Einheiten als getrennte erscheinen – und sich aufeinander beziehen, wo konstituierte Praxis/Ordnungen aufeinander treffen: in die Welt der sozialen Auseinandersetzungen.

7.5 Zur Gesamtstruktur des sozialen Konstitutionsmechanismus

Die Komponenten der Konstitutionsdynamik weisen strukturelle Gemeinsamkeiten auf. Diese lassen sich anhand der strukturellen Übereinstimmungen der Teilmodelle illustrieren. Vergleiche dazu die Abbildung 7.15, die die Elemente der Konstitutionsdynamiken nebeneinander darstellt. Es handelt sich hierbei um den Prozess des praktischen Anerkennens aus Abbildung 7.4, den des Aufbaus strukturellen Vermögens aus Abbildung 7.7 und den Prozess symbolischer Refelexion aus Abbildung 7.11. Zu den Ähnlichkeiten der Teilprozesse im einzelnen.

Die Analyse der **praktischen Anerkennung** ergibt folgenden Prozess: (a) Eine Praxis/Ordnung (P/O) (b) bezieht eigenes kommunizierendes Verhalten auf bestimmte Momente (c) des Universums kommunizierenden Verhaltens und (d) hebt diese dadurch als Einheit hervor, d.h. sie umgrenzt und bestimmt sie als ein „Etwas“.[46] (e) Fortan bezieht die Praxis/Ordnung kommunizierendes Verhalten auf dieses ab- und eingegrenzte „Etwas“ (kommunizierend verhalten). (f) Dadurch ist ein neuartiges kommunizierendes Verhalten (auf etwas bezogenes k.V.) entstanden, denn indem es sich auf das neu entstandene Etwas bezieht, ist

[46] Dabei kann es sein, dass dieses „Etwas“ schon vorher von anderen Praxis/Ordnungen, möglicherweise sogar von sich selbst, als Einheit hervorgehoben wurde und dauerhaft als solche existiert: Einige Studierende hören zum ersten Mal etwas von der universitären Selbstverwaltung, vom Fachbereichsrat – aber dieser ist als soziale Institution längst etabliert.

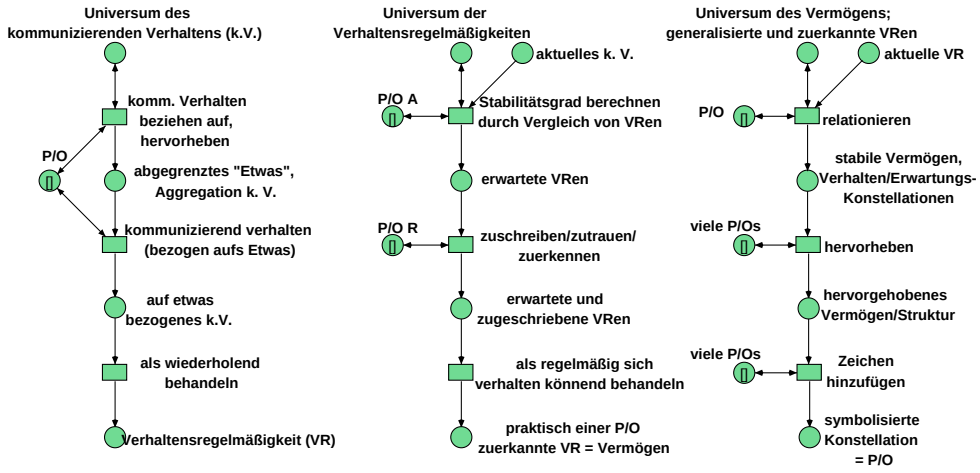


Abbildung 7.15: Vergleich der Teilprozesse der Konstitutionsdynamik aus den Abbildungen 7.4, 7.7 und 7.11

es selbst durch die Beziehung zu diesem Etwas, die seine Eigenschaft ist, „neuartig“ geworden – und als solches dem Universum kommunizierenden Verhaltens hinzu gefügt. Das neue kommunizierende Verhalten gehört im Moment seines Entstandenseins dem Universum kommunizierenden Verhaltens an. (g) Werden dann weitere Sequenzen kommunizierenden Verhaltens also solche anerkannt, die dem neuartigen kommunizierenden Verhalten *gleichen* und es dadurch *wiederholen*, dann wird das neuartige kommunizierende Verhalten dann als sich wiederholend behandelt und damit (h) werden diese einander gleichenden bzw. sich wiederholenden Sequenzen kommunizierenden Verhaltens als eine neue Verhaltensregelmäßigkeit konstituiert.

Strukturgleich spielt sich der Konstituierungsprozess **strukturellen Vermögens** ab. (a) Eine aktive Praxis/Ordnung (P/O A) (b) relationiert die (b1) neuartige Verhaltensregelmäßigkeit mit bestehenden Verhaltensregelmäßigkeiten – die sie allesamt aus dem (c) Universum der Verhaltensregelmäßigkeiten unter dem Gesichtspunkt der Differenz bzw. Identität[47] und bildet dadurch Erwartungen an den Grad der In-/Stabilität sowohl der neuartigen als auch der mit ihr verglichenen Verhaltensregelmäßigkeiten (Transition Stabilitätsgrad berechnen durch Vergleich der VRen). (d) Das Resultat dieser vergleichenden In-/Stabilitäts-Berechnung sind konkrete Erwartungen an künftige und (im Vergleich zur neuen) alternative Verhaltensregelmäßigkeiten: erwartete Verhaltensregelmäßigkeiten. Ein bestimmtes kommunizierendes Verhalten immer wieder auszuüben bzw. zu aktualisieren – also eine Verhaltensregelmäßigkeit – wird dabei (e) immer von einer oder mehreren bestimmten Praxis/Ordnung(en) erwartet, ihr zu-erkannt – dies ist ebenfalls ein praktisches Anerkennen (Transition zuschreiben/zutrauen/zuerkennen). (e1) Die Zuerkennenden bzw. Anerkennenden

[47] Die aktive Praxis/Ordnung prüft also den Grad der Verschiedenheit resp. Gleichheit der neuartigen Verhaltensregelmäßigkeit im Verhältnis zu den bestehenden Verhaltensregelmäßigkeiten.

sind dabei ebenfalls Praxis/Ordnungen, die sich aber eher rezeptiv verhalten (P/O R). (f) Fortan wird nun diese Praxis/Ordnung so behandelt, als könne sie sich regelmäßig in erwarteter Weise verhalten, als wäre also die Verhaltensregelmäßigkeit eine ihrer Eigenschaften, eine ihrer Fähigkeiten – (g) und diese von einer Praxis/Ordnung erwartete, ihr praktisch zuerkannte bzw. als ihre Eigenschaft praktisch anerkannte Verhaltensregelmäßigkeit ist dann ein strukturelles *Vermögen* dieser Praxis/Ordnung.

Die **reflexive Symbolisierung** oder symbolische Reflexion schließlich ist eine strukturell identische Dynamik. Der Ausgangspunkt, der den Universen kommunizierendem Verhaltens bzw. der Verhaltensregelmäßigkeiten entspricht, ist nun das Universum struktureller Vermögen bzw. Vermögensstrukturen. Indem eine Praxis/Ordnung (die Stelle P/O) nun eine neu auftretende oder neu von ihr anerkannte Verhaltensregelmäßigkeit (die Stelle aktuelle VR) mit bestehenden Vermögen/Strukturen aus jenem Universum relationiert (Transition relationieren), (an)erkennt sie, welche der relationierten Vermögen/Strukturen stabil sind. Stabile Vermögen/Strukturen sind solche, die von relativ vielen Praxis/Ordnungen (Stelle viele P/Os) hervorgehoben werden. Die Transition hervorheben generiert daher die hervorgehobenen Vermögen/Strukturen Indem diesen Zeichen hinzu gefügt werden (Transition Zeichen hinzufügen , werden sie symbolisiert.

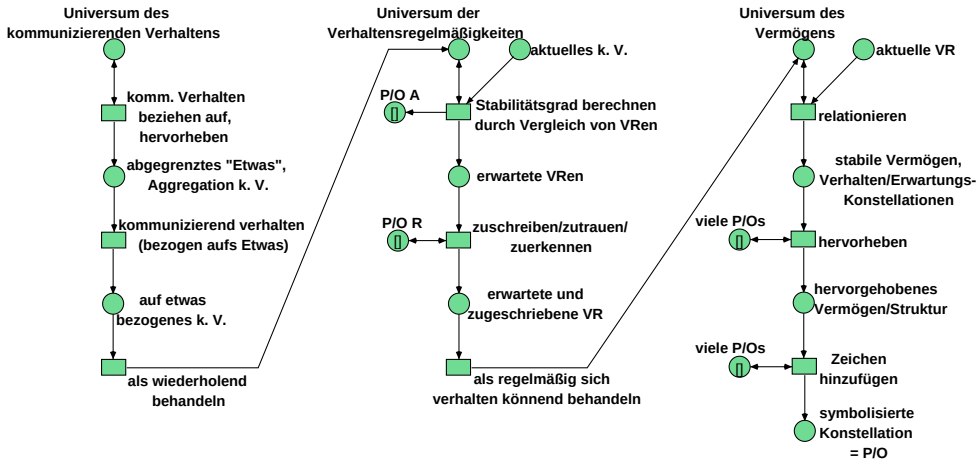


Abbildung 7.16: Konstitutionsdynamik

Die gesamte Konstitutionsdynamik einer Praxis/Ordnung lässt sich dann als ein integriertes Modell darstellen. Abbildung 7.16 zeigt die Integration der Teilmodelle zu dem Gesamtmodell der Konstitutionsdynamik. Es entsteht, indem man die in den Modellen identischen Elemente miteinander verbindet.

Wir können die Darstellung der Konstitutionsdynamik aus Abbildung 7.16 so verändern, dass die Form in der Abbildung 7.17 entsteht. Diese beiden Modelle unterscheiden sich inhaltlich nicht, lediglich das Layout des Netzes hat sich geändert. Die neue Form ist so gewählt worden, dass man leicht erkennen kann, dass die Konstitutionsdynamik eine Verfeinerung der abstrakten Sichtweise in Abbildung 7.14 darstellt. Dies zeigt, dass die Detailmodellierung konsistent mit der eingangs dargestellten Form der Konstitutionsdynamik ist.

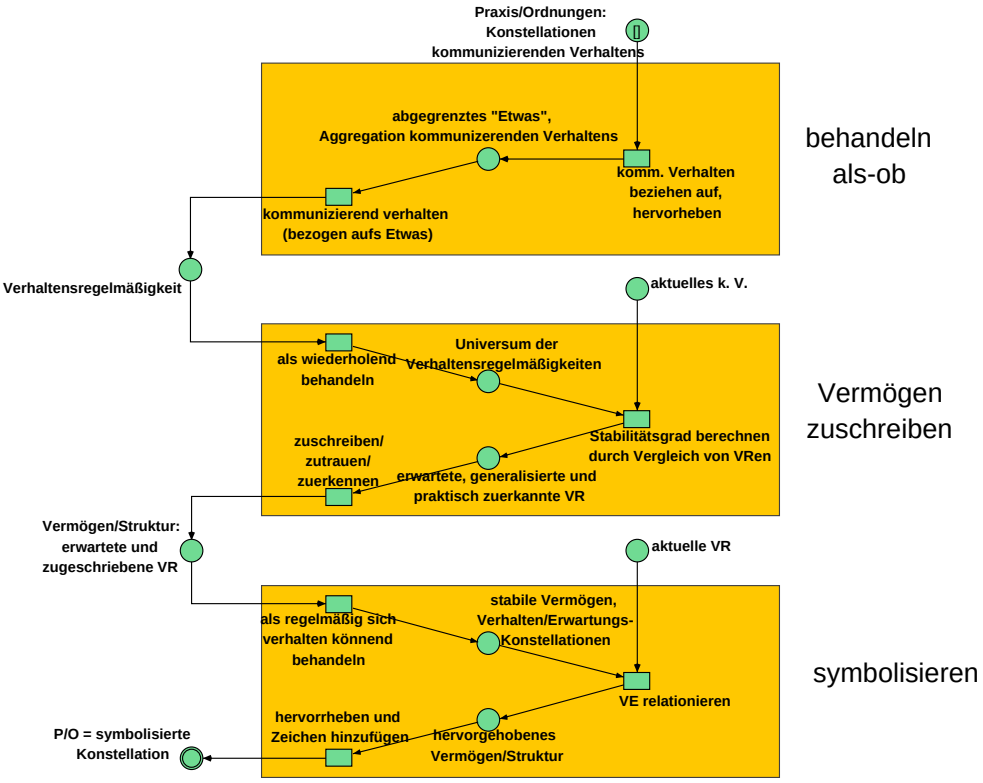


Abbildung 7.17: Konstitutionsdynamik mit Vergröberungen

7.5.1 Die Konstitutionsdynamik als operationales Modell

Das parametrisierte Modell in Abbildung 7.18 gibt eine operationalisierte Sichtweise der Konstitutionsdynamik dar. Es stellt eine Fortentwicklung des Modells aus Abbildung 7.17 dar und wurde in (Köhler u. a., 2007) im Detail vorgestellt.

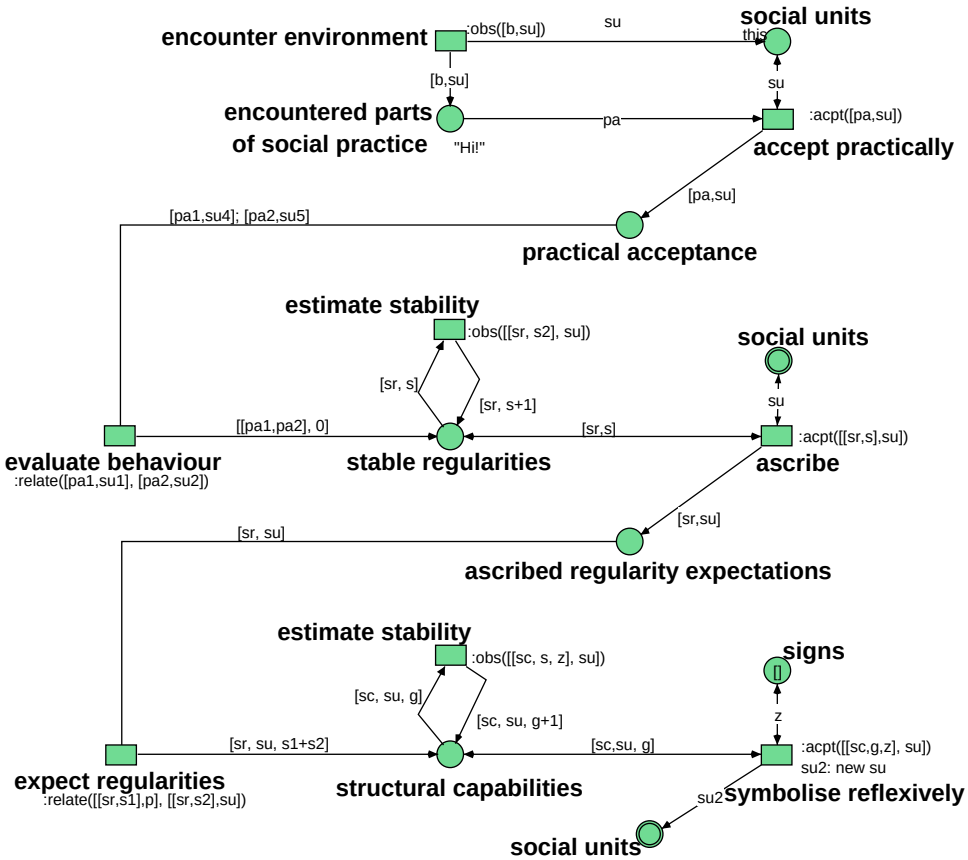


Abbildung 7.18: Das Petrinetzmodell einer Praxis/Ordnung

Die Modellelemente, wie beispielsweise *accept practically* (praktische Anerkennung), *expect regularities* (Regelmäßigkeiten erkennen), *ascribe* (zuschreiben), *symbolise reflexively* (reflexiv symbolisieren) etc., werden als Transitionen modelliert, die Konzepte, wie *stable regularities* (stabile Verhaltensregelmäßigkeiten) oder *structural capabilities* (Vermögensstrukturen) als Stellen. Die Symmetrien der Teilprozesse sind auch in dieser Darstellung klar anhand der graphischen Übereinstimmungen zu erkennen.

Die Modellierung erlaubt es darüberhinaus, das Modell weiter zu konkretisieren. Wir haben gegenüber dem Modell aus Abbildung 7.17 in Abbildung 7.18 die Unterscheidung zwischen den „normalen“ Verhaltensregelmäßigkeiten und den durch den Vergleich besonders ausgezeichneten generalisierten und praktisch zuerkannten Verhaltensregelmäßigkeiten aufgegeben und beide zu den stabilen Verhaltensregelmäßigkeiten (stable regularities) zusammengefasst, da es sich in beiden Fällen um Verhaltensregelmäßigkeiten handelt, die sich nur in ihren Attributen

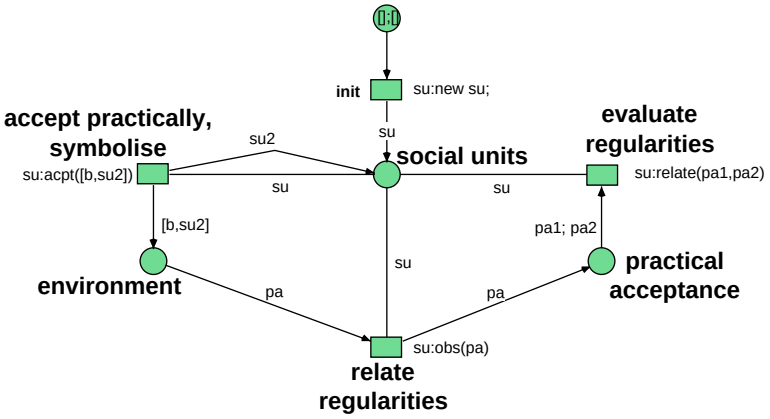


Abbildung 7.19: Das Petrinetzmodell des Sozialen

unterscheiden. Diese Vereinheitlichung drückt sich im Modell dadurch aus, dass wir beide Stellen zu einer einzigen verschmolzen haben. In gleicher Art und Weise wurden die Stellen Vermögen und hervorgehobenes Vermögen vereinheitlicht.

Das Sozialsystem besteht aus der Gesamtheit aller P/Os. Es wird durch das Modell in Abbildung 7.19 modelliert. Die Stelle social units enthält mehrere Praxis/Ordnungen, die alle jeweils Netzmarken mit der Struktur aus Abbildung 7.18 sind. Die drei Transitionen relate regularities, evaluate regularities und accept practically, symbolise sind die drei Großkategorien abstrakter Teilprozesse (s.u.), die jeweils den in Abbildung 7.18 untereinander angeordneten Transitionen entsprechen, d.h. relate regularities ist die Oberkategorie zu expect regularities und evaluate behaviour. Analog ist evaluate regularities die Oberkategorie zu estimate stability und accept practically, symbolise die Oberkategorie zu accept practically, ascribe und symbolise. Die Transitionen der gleichen Kategorie sind untereinander durch synchrone Kanäle verbunden, wodurch die beiden Modellebenen – Praxis/Ordnungen und Sozialsystem – aneinander gekoppelt sind.

7.5.2 Grundstruktur der Konstitutionsdynamik

Es wird erkennbar, dass die Konstitutionsdynamik über eine allgemeine Struktur verfügt, die in Abbildung 7.20 dargestellt ist.

1. Es gibt ein Universum von Einheiten und eine neu auftretende Einheit (Stelle aktuell Relevantes).

2. Eine Praxis/Ordnung relationiert bestehende und neue Einheiten.

3. Die relationierten Einheiten sind nun als übergreifende Einheit behandelbar.

4. Die relationierten Einheiten werden bzw. die übergreifende Relation/Einheit wird nochmals relationiert, mit mindestens einer anderen Einheit. Durch diese Relation wird die übergreifende Einheit befestigt und besondert.

5. Fortan wird sie als dieselbe wiederholt behandelt (und dann: bezeichnet).
6. Als wiederholte „steigt“ sie in das Universum der Einheiten der nächsten Komponente „auf“.

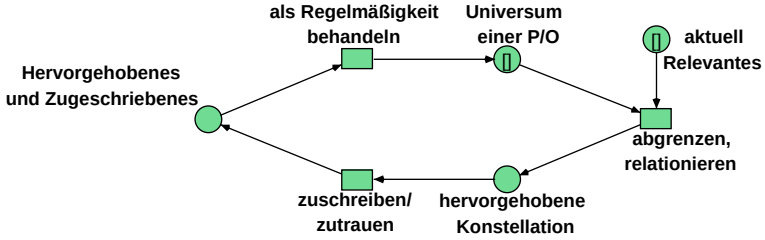


Abbildung 7.20: Wiederkehrende Grundstruktur der Netze aus Abb. 7.15, 7.16 und 7.17

Praktische Anerkennung bedingt dabei die Möglichkeit der Bildung strukturellen Vermögens, und dieses wiederum wirkt als Möglichkeitsbedingung für reflexive Symbolisierung bzw. symbolische Reflexion.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Modellierung des Konstitutionsmechanismus sozialer Systeme gezeigt, wie ihn die Theorie sozialer selbstorganisierender Systeme nach Roman Langer beschreibt. Der Konstitutionsmechanismus baut auf drei Aspekten auf. Der erste Aspekt ist die Praktische Anerkennung als sozial konstitutiver Prozess, der zum Ausdruck bringt, dass Verhalten wertende Anerkennungen kommuniziert, welche aber transintentional ist. Praktische Anerkennung dient der Theorie als Reformulierung des soziologischen Handlungsbegriffs. Der zweite Aspekt ist der des strukturellen Vermögens, der auf der Erzeugung von Verhaltensregelmäßigkeiten und damit einhergehenden Erwartungsbildung über die Verhaltensregelmäßigkeiten, die Akteure einander zutrauen, basiert. Der dritte Aspekt betrifft die symbolische Reflexion. Soziale Orientierung entsteht durch Differenzreflexion und Vermögenssymbolisierung, was zu einer Stabilisierung der Sozialwelt führt. Symbolisierung besitzen eine Ordnungs- und Orientierungsfunktion in Form von Normen, Regeln, Verfahren, Titel usw.

Die Modellierung des Konstitutionsmechanismus machte den systematischen inneren Aufbau durch Anerkennungs- und Symbolisierungsprozesse besonders deutlich. Die Modellstruktur ließ sich daher ohne großen Aufwand direkt zu einem operationalen Modell der Konstitutionsdynamik erweitern.

8 Ein Rahmenmodell reflexiv selbstorganisierender Systeme

Die Skalierungsfrage in Agentensystemen (d.h. die Frage wie soziale Koordienierung auch bei wachsenden Agentenzahlen effizient realisiert wird) beschäftigt sich mit dem Bezug von Akteuren und sozialen Strukturen. Sie ist eng mit der Frage verbunden, wie Agentensystemen aus sich selbst heraus die Fähigkeit besitzen können, emergente neue Sozialstrukturen entstehen zulassen. Eine Analyse emergenter Prozesse sozialer Systeme kann – wie bereits in den vorausgegangenen Abschnitten dargestellt – nur vor dem Hintergrund der Mikro/Makro-Dualität vorgenommen werden. Betrachtet man soziale Systeme, so ist zunächst festzustellen, dass diese trotz Emergenz eine bemerkenswerte Stabilität und Konstanz aufweisen, die es überhaupt erst ermöglicht, von Sozialstrukturen zu sprechen. Der vermeintliche Gegensatz löst sich dadurch auf, dass sich Sozialstrukturen im allgemeinen identisch reproduzieren. Das lässt darauf schließen, dass emergente Phänomene durch einen tiefer liegende Reproduktionsmechanismus stark kanalisiert werden: Sozialstrukturen schaffen sich Akteure, die zu Ihnen passen – umgekehrt erzeugen Akteure solche Strukturen, die sie ausfüllen können.[1]

Wir analysieren im folgenden die strukturellen Beziehungen im Mikro/Makro-Modell. Analog zur *Theorie sozialer Selbstorganisation (TSSO)* (Langer, 2005, 2006) nehmen wir die strukturellen Theoriesymmetrien von Mikro- und Makroelementen zum Ansatzpunkt, ein rekursives Modell zu formulieren. Es handelt sich hierbei um die Symmetrien der beiden Theorieelemente *Struktur* und *Akteur*, die wir im folgenden als Ausprägungen eines allgemeineren Konzepts, *soziale Entität* genannt, begreifen. Die Tatsache, dass alle sozialen Entitäten, egal ob sie soziale Strukturen oder Akteure beschreiben, strukturgleich sind, erlaubt eine Beschreibung des Sozialen auf eine einheitliche Art und Weise. Die Entitäten sind – in Analogie zur TSSO – extensional durch ihre strukturellen Relationen untereinander charakterisiert. Im folgenden wollen wir das Augenmerk insbesondere auf die Strukturen richten, die die Handlungen der handelnden Einheiten bestimmen.

[1] Elias sieht diesen Mechanismus im Über-Ich der Akteure, das durch Internalisierung und Kontrolle für eine Passung von gelebter und etablierter Norm sorgt. Bourdieu formuliert dies ähnlich als Korrespondenz von Habitus und Logik des Feldes. Die Unterscheidung von normativen Erwartungen – beispielsweise in Form von Rollen – als Haltung eines Akteurs gegenüber sich selbst einerseits und als Haltung anderer Akteure gegenüber diesem Akteur andererseits ist in einer solch wechselseitig angepassten Situation nicht mehr notwendig, da beide Formen zusammenfallen.

8.1 Prädisposition als Theoriesymmetrie

Auf den ersten Blick sind Mikro- und Makroperspektive inhaltlich sehr unterschiedlich und werden daher in den Sozialwissenschaften auch als unterschiedliche Akzente, wenn nicht gar als Paradigmen gesehen, beispielsweise im Gegensatzpaar „Interaktionismus/Strukturalismus“ (vgl. dazu die Ausführungen in Kapitel 5). Von einer analytischen Perspektive aus, die anhand der Modelle nach Unterschieden bzw. Übereinstimmungen sucht, wird sich zeigen, dass die Modelle große Ähnlichkeiten aufweisen. Die ist keineswegs überaschend, denn die Modelle setzen ja gerade die Erkenntnis um, dass soziale Strukturen und soziales Handeln aufeinander abgestimmt sind, sei es als Reproduktion von Normbefolgung/Internalisierung bei Elias, als Habitus/Feld-Dialektik bei Bourdieu oder in Form von Erhaltung des Investitionswertes in Sozialstrukturen bei Popitz. Beschäftigen wir uns im folgenden mit den grundlegenden Ähnlichkeiten des Mikro/Makro-Modells.

8.1.1 Selbstähnlichkeit

Die petrinetzbasierte Theorie-Reanalyse von Gesellschafts und Akteurstheorien ermöglichte es, die Stärken und Schwächen der jeweiligen Richtung herauszuarbeiten. Aufbauend auf der Reanalyse in Kapitel 6 konnte eine Theorie-Integration in Hinblick auf die Gemeinsamkeiten erfolgen. Das Ergebnis war das integrierte Mikro/Makro-Modell (vgl. dazu auch Kapitel Elf in v. Lüde u. a., 2003). Das Mikro/Makro-Modell leistet eine notwendige Explizierungsarbeit von Begriffen und Konzepten. Für die leichtere Lesbarkeit zeigt Abbildung 8.1 das Modell (Abbildung 6.62, dargestellt in Kapitel 6) hier erneut.

Bemerkenswert ist die durch das Modell erreichte analytische Trennung von Begriffen, die von den Theorien mit leichten Variationen auf mehreren Abstraktionsebenen eingesetzt werden. Insbesondere der Begriff der *Struktur* taucht auf allen Ebenen des Modells auf, wobei seine konkrete Bedeutung jeweils eine leichte Abwandlung erfährt.

Eine weitergehende Analyse dieses Modells wird nun zeigen, dass soziale Strukturen, Prozesse und Akteure – jenseits der jeweils verwendeten Nomenklatur – ähnlichen Aufbau und Funktionalität besitzen. Im folgenden analysieren wir diese Gemeinsamkeiten und gelangen im Ergebnis zu einer abstrakten Beschreibung von Sozialität durch Systeme, die in rekursiver Weise auf andere Systeme bezogen sind.

Das Mikro/Makro-Modell bietet mehr als nur einen allgemeinen Bewertungs- und Erklärungsrahmen, denn es lassen sich noch weitere Ergebnisse aus dem Modell ableiten. Die Integration zeigt, dass die einzelnen Ebenen eine grundlegende Ähnlichkeit besitzen, beispielsweise in der prozesshaften Behandlung von Struktur auf allen Ebenen. Gibt man die Anschauungsebenen des Akteurs, des Feldes und der Sozialstruktur auf, so gelangt man anhand der formalen Übereinstimmungen zu einem generalisierten Modell, das die Anschauungsebenen als Spezialfälle enthält. Dies ist einleuchtend, da auch in der Alltagswelt soziale Systeme unterschiedliche Facetten besitzen.[2] Welche der Facetten wirksam

[2]Dies illustriert das folgende Beispiel: Eine Gewerkschaft wird als Akteur wahrgenommen,

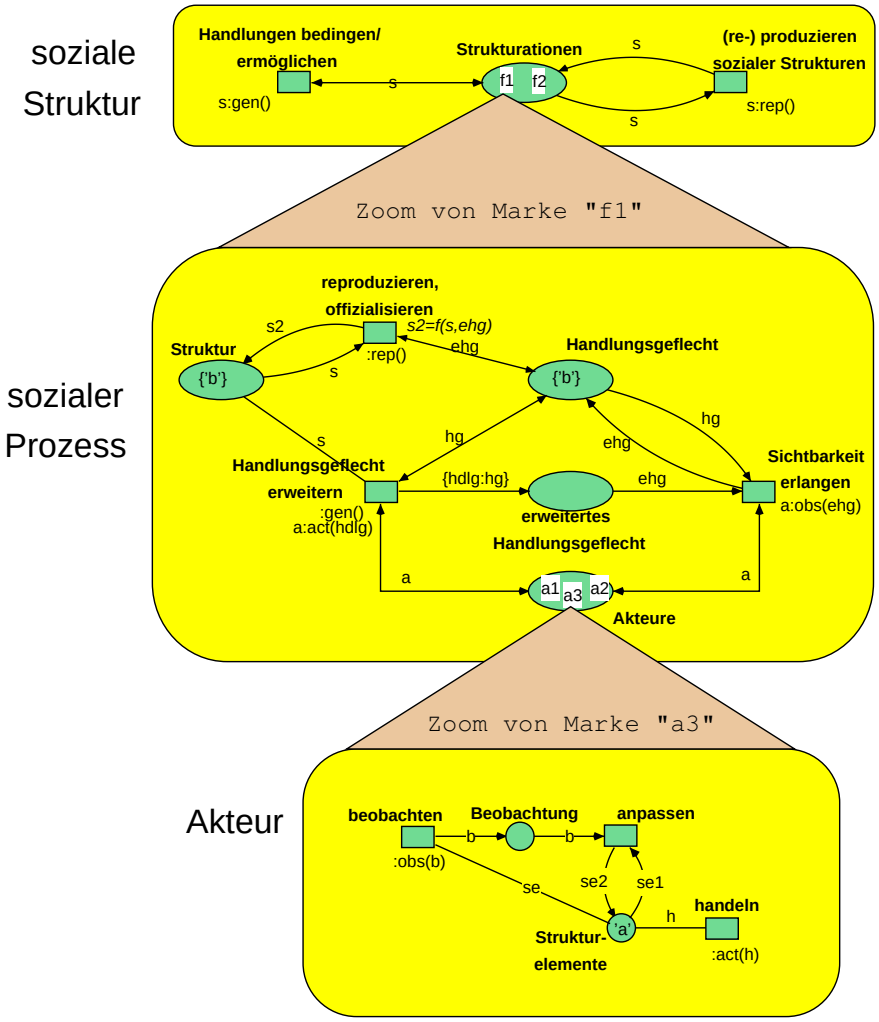


Abbildung 8.1: Abstraktes Modell einer Sozialtheorie

wird, ist abhängig von der subjektiven Zuschreibung der beobachtenden Akteure. Erst durch das Behandeln als Akteur, Prozess oder Struktur erfüllt eine Entität eben genau diese Facette, die somit Realität erfährt. Hinreichend viele Systeme vorausgesetzt, werden alle Facetten an einer Entität anerkannt.

Die *Selbstähnlichkeit* des Mikro/Makro-Modells aus Abbildung 8.1 in allen drei Ebenen kann sehr gut anhand der Struktur des Feldnetzes aus Abbildung 8.1 (mitte) demonstriert werden. Abbildung 8.2 zeigt eine zweite Darstellung des Feldnetzes, die sich von dem Original nur in der graphischen Anordnung unterscheidet. In dieser zweiten Darstellung zeigen sich die strukturellen Ähnlichkeiten des Feldes zum Akteur des Mikro/Makro-Modells sofort: Die Netztopologie und die abstrakte Intention der Elemente ist nahezu identisch.

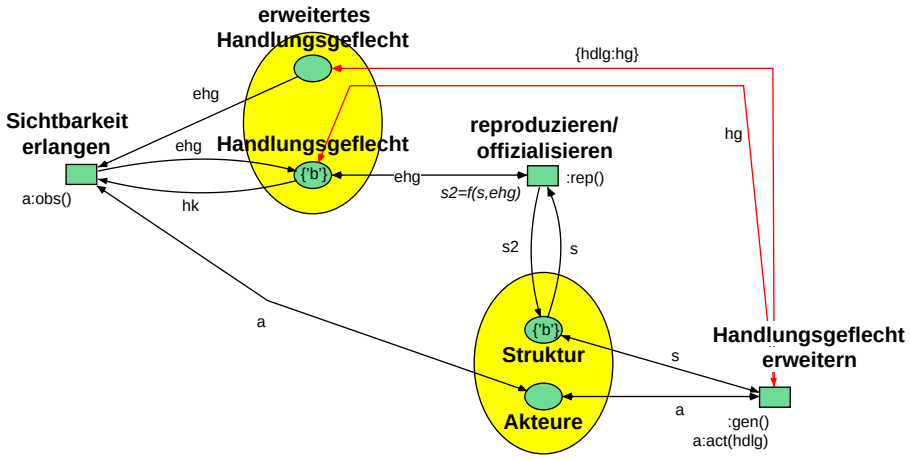


Abbildung 8.2: Feldnetz – umformatierte Darstellung

Die formale Ähnlichkeit ist nicht rein zufällig, sondern entspringt der inhaltlichen Übereinstimmung der Prozesse: Sowohl der Akteur als auch das Feld besitzen Prozesse des Handelns, des Beobachtens und des Anpassens. Ein Feld handelt, da es die Aktionen bedingt und sie im sozialen Raum wirklich werden lässt. Es beobachtet, da im Feld Handlungen beobachtet und beispielsweise auf ihre Konformität hin kontrolliert werden. Ebenso passt sich ein Feld an, da – um mit Bourdieu zu sprechen – in ihm als Schauplatz sozialer Kämpfe die Wechselkurse symbolischen Kapitals bestimmt werden.

Es besteht jedoch ein grundsätzlicher Unterschied zwischen dem Modell des Akteurs und dem des Feldes: während ein Akteur nur seine *Außenwelt* – im allgemeinen andere Akteure – beobachtet, analysiert das Feld auch die Aktionen seiner *Innenwelt*, nämlich die Handlungen aller dem Felde zugehörenden Akteure. Dieser Unterschied zeigt sich in dem Modell am deutlichsten an der

der beispielsweise im Arbeitskampf in Erscheinung tritt. Gleichzeitig besitzt eine Gewerkschaft aber auch die Eigenschaft einer Struktur mit eigenem Symbolsystem, innerhalb dessen beispielsweise das Symbol der „Solidarität“ zentrale Bedeutung besitzt. Genauso kann der Prozesscharakter des Systems „Gewerkschaft“ hervorgehoben werden, in dem um die Auslegung von Symbolen gerungen wird, beispielsweise, ob Solidarität eine Verantwortung nur mit den Gewerkschaftsmitgliedern oder aber mit allen Arbeitern impliziert.

Tatsache, dass die Handlungsgeflecht Nebenbedingung des Handelns im Feld ist, hierzu aber keine Entsprechung im Akteurnetz existiert.

Es zeigen sich ebenso zwei Formen der Anpassungsprozesse. Die Anpassungsleistung des Feldes wird als Strukturdynamik bezeichnet und ist nach innen gerichtet. Eine nach außen gerichtete Anpassung eines Systems existiert ebenso, nämlich auf Ebene des Akteurs.

Es ist leicht einzusehen, dass beide Richtungen sowohl für den Akteur als auch das Feld inhaltlich sinnvoll sind. So existiert beispielsweise für den Akteur der Prozess der Reflektion, der einer inneren Beobachtung des Akteurs durch sich selbst entspricht. Auch kann das Feld eine Beobachtung seiner Außenwelt vornehmen, beispielsweise dann, wenn es als korporativer Akteur wiederum tätig wird.

8.1.2 Prädisposition als Grundlage der sozialen Reproduktion

Die Analyse der Mikro/Makro-Verbindungen in den Sozialtheorien zeigte in übereinstimmender Weise, dass bestehende Sozialstrukturen auf einer Prädisposition von sozialen Strukturen und Akteuren aufbaut. Im Falle einer solchen Prädisposition reproduzieren die sozialen Prozesse den Status Quo. Auch ist ein System mit prädisponierten Akteuren schwerer zu stören, da seine Elemente die Strukturen verinnerlicht haben und daher unbewusst stets danach trachten, den aktuellen Zustand zu erhalten.

Diese Prädisposition besteht bei Elias in der Abstimmung von Über-Ich und sozialen Normen (vgl. Kapitel Drei in v. Lüde u. a., 2003). Elias geht von Akteuren aus, die Angst vor Liebesentzug bzw. Prestigeverlust besitzen. Diese Angst bewirkt eine Anpassung an die soziale Kontrolle, indem die Fremdzwänge in Form von Selbstzwängen internalisiert werden. Die Internalisierung ist dabei in Form des *Über-Ich* modelliert, also in Trennung zum *Ich*. Diese Selbstkontrolle bewirkt somit normkonformes Verhalten, was durch Bestätigung der Gruppe die Ängste der Akteure mindert. Auf der Akteurseite stehen also Normen und Selbstkontrolle in der prozesshaften Wechselseitigkeit.

Auch bei Bourdieu findet sich die Gedankenfigur der Voranpassung, hier die von Habitus und Feld (vgl. Kapitel Fünf in v. Lüde u. a., 2003). Der Habitus ist das universelle Wahrnehmungs-, Denk- und Handlungsschema der Akteure, das von diesen in inkorporierter Form übernommen wird. Der Habitus, den sich die Akteure aneignen, wird vom Feld gesetzt und erzeugt genau die Handlungen, die zu seiner Erzeugung geführt haben. Auf diese Art und Weise werden ebenso die Existenzbedingungen, die zur Konstruktion des Feldes geführt haben, reproduziert.

Ähnliches beschreibt Popitz auf Basis von Verhaltensregelmäßigkeiten (vgl. Kapitel Zehn in v. Lüde u. a., 2003). Akteure machen ihr Verhalten voraussehbar bzw. erwartbar, indem sie es „verregelmäßigen“. Mit jeder ihrer ungezählten alltäglichen konformen Handlungen knüpfen Akteure am Netz der bestehenden Ordnungsbeziehungen, in das sie sich dadurch weiter verstricken. Da sie mit ihren Handlungen in die bestehende Ordnung investieren, besitzen sie ein Interesse am Bestehen der Ordnung, denn sie wollen den Ertrag ihrer investierten Handlungen nicht verlieren.

Dieser Reproduktionsmechanismus sorgt für eine Stabilisierung, sofern Mikro- und Makroelemente eine Prädisposition aufweisen. Besonders deutlich treten diese Mechanismen zu Tage, wenn die wechselseitige Passung nicht oder nicht im vollen Umfang vorhanden ist. In diesem Fall passen sich Akteure und Strukturen entweder solange einander an, bis eine Passung entsteht, oder das System stabilisiert sich nicht.[3] Die Mechanismen, deren sich ein System im Falle nicht angepasster Elemente bedient, sind prinzipiell die gleichen, die im stabilen Zustand Anwendung finden. Die Anpassungsprozesse zeigen besonders deutlich, dass auch ein System harmonisch abgestimmter Elemente keineswegs statisch ist, sondern sich vielmehr ebenfalls durch Ab- und Ausgrenzungsprozesse bzw. durch soziale Kämpfe ständig reproduziert – wenn auch in identischer Art und Weise.

8.1.3 Dualität versus Symmetrie

Die in den Sozialtheorien vorgenommene Modellierung der Mikro/Makro-Verbindung auf Basis von prädisponierten Strukturen zeigt, dass darauf verzichtet werden kann, beide Perspektiven getrennt zu betrachten, da sie sich im jeweils anderen immer indirekt wiederspiegeln. Plakativ fomuliert: Jeder Akteur inkorporiert die soziale Struktur (wenn auch nicht vollständig oder verzerrungsfrei), und jede Struktur erscheint als das homogenisierte Bild der Handlungslogiken. Die Prädisposition stellt eine *Symmetrie* der Theorie dar, oder mit anderen Worten: Die Theorie besitzt *Selbstähnlichkeit*.

Die Spiegelung in Form prädisponierter Strukturen befreit die Informatik von dem Dilemma, dass sie einerseits neben Akteuren auch Prozesse und Sozialstrukturen als gleichberechtigte Modellelemente betrachten will, um zu Modellen zu gelangen, die konzeptionell weiter als rein akteurszentrierte Ansätze führen, dass sie andererseits aber im Rahmen von Agentensystemen auf die zentrale Perspektive des Agenten vorfestgelegt ist. Diese Problematik löst sich auf, indem der Agent seine Umwelt nicht als Agentensystem wahrnimmt, sondern als ein System, das auf den strukturellen Gemeinsamkeiten der Einzelperspektiven *Sozialstruktur*, *Prozess* und *Akteur* aufgebaut ist. Dieser Ansatz führt insgesamt zu einer rekursiven Theorie.

Generalisiert man die Theorie anhand ihrer Symmetrie, so entsteht ein Modell, das nur noch eine Klasse von Objekten enthält. Die Objekte bezeichnen wir als *Entitäten*. Das Mikro/Makro-Modell mit seinen drei Ebenen (bestehend aus Akteuren, Feldern und Strukturen) erweist sich dann als Spezialisierung der generischen Sichtweise in Form einer dreistufigen Aggregationsbeziehung. Kurz gesagt: Wir gehen also davon aus, dass Akteure und Prozesse sich nur in der Betrachtungsweise unterscheiden, mit anderen Worten, dass sie das gleiche Theoriekonstrukt darstellen. Damit verschwindet gleichzeitig auch die in

[3] Elias beschreibt, dass eine Stabilisierung durch das Ausgrenzen von Außenseitern und durch die Verfeinerung der Normen geschieht. Am Ende des Prozesses haben sich die Außenseiter entweder integriert, indem sie die geltenden Normen internalisiert haben, oder sie sind komplett ausgegrenzt worden und haben keinen destabilisierenden Einfluss mehr. Bourdieu beschreibt diesen Prozess ganz analog als sozialen Kampf, der um die „richtige“ Verwendung (und wichtig: um die Wechselkurse) von Symbolen geführt wird.

der Mikro/Makro-Formulierung angelegte Konzepthierarchie: Die Konzepthierarchie äußert sich darin, dass Theorien, die Mikro- und Makroperspektive formulieren, im allgemeinen Mikroperspektive als die primäre und die Makroperspektive als Aggregationseffekt ansehen. Damit sind Mikroelemente notwendig, um Makroelemente zu definieren. In der symmetrischen Betrachtungsweise gibt es dieses zweistufige Verfahen nicht und damit auch keine Konzepthierarchie.

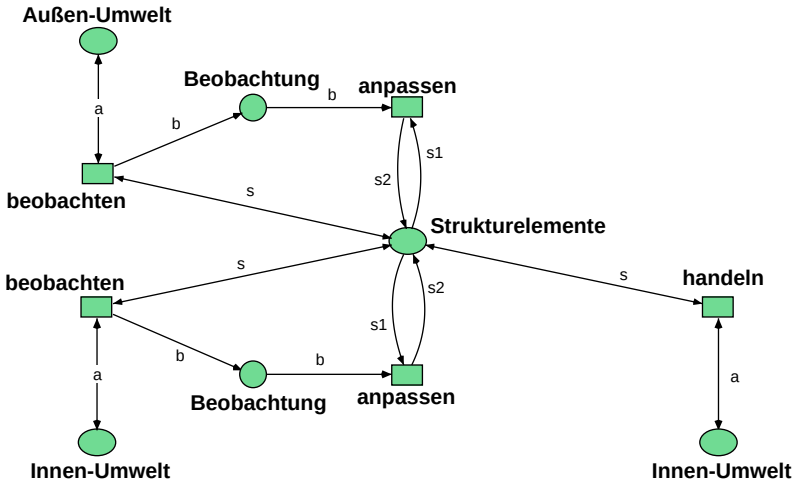


Abbildung 8.3: Eine soziale Entität

Das Modell einer Entität entsteht durch die Generalisierung der Gemeinsamkeiten des Akteurs (Abbildung 8.1 unten) und des Feldes (Abbildung 8.1 mitte bzw. Abbildung 8.2). Das entstehende Modell ist in Abbildung 8.3 dargestellt. Jedes Entität besitzt eine Innen- und eine Außen-Umwelt. Die Innen-Umwelt besteht aus den Entitäten, die diese Entität konstituieren, beispielsweise seine ihm zugehörigen Akteure. Die Außen-Umwelt besteht aus den Entitäten, mit den das System wiederum selbst eingebettet ist. Es ergibt sich also eine rekursive Struktur, da eine Entität wiederum Entitäten enthält und in Entitäten enthalten ist. Die Art und Weise, in der diese Systeme mit ihrer Umwelt agieren, ist somit in hohem Maße anschlussfähig an die soziologische Systemtheorie.

Die Prozesse einer Entität sind das Beobachten, das Handeln und das Anpassen jeweils bezogen auf die Innen- und die Außen-Umwelt der Entität, sowie seine Strukturelemente. Dabei ist zu beachten, dass die Strukturelemente die Zugehörigkeit von Entitäten zur Innen- oder zur Außen-Umwelt bestimmen, d.h. die Aggregationsrelation ist dynamisch und ebenso jedes einzelne Strukturelement. Strenggenommen erzeugt also erst die Verbindung von Aktionen mit dem Strukturelement der Aggregationsrelation die Klassen der Entitäten, die zur Innen-, zur Außen-Umwelt oder zu keiner Umwelt gehören.

Das Modell ist also rekursiv, in dem Sinne, als dass Entitäten durch ihre Relation zu Entitäten charakterisiert werden. Dies war in Ansätzen schon im Mikro/Makro-Modell angelegt, denn ein Akteur, der im Feld agiert, kann als Individuum gedeutet werden. Nichts spricht jedoch dagegen, auch korporative Akteure – z.B. Organisationen – in Feldern zuzulassen, die ihrerseits ein Feld für

die von dem korporativen Akteur aggregierten Akteure darstellen. Die Hinzunahme von korporativen Akteuren stellt also bereits eine Form der Rekursivität dar, so dass die Rekursivität des generalisierten Modells nur eine konsequente Fortführung des Prinzips ist.

Der prinzipielle Unterschied eines rekursiven Modells zu einem hierarchischen liegt darin, dass keine Theorieebenen (weder Mikro noch Makro) existieren, wie dies im Badewannen-Modell der Fall ist. Im Gegensatz zu individualistischen Ansätzen hat ein rekursives Modell auch keine Probleme zu erklären, wie Normen existieren oder gar entstehen können – ein Erklärungsproblem, das auftritt, sobald alles, was sozial existiert, nur aus Individuen besteht.

Die rekursive Systemstruktur vereinfacht aber nicht nur den Theorieaufbau, sondern bildet auch die Voraussetzung für Emergenz. Wie wir noch sehen werden ist nicht nur die Definition der Entitäten rekursiv, sondern auch ihre Dynamik, denn Entitäten können neue Entitäten durch Rekursion generieren, wodurch Entitäten höherer Ordnung entstehen. Es emergieren mithin neue Systemqualitäten. Dies ist möglich, da Entitäten sowohl als Subjekt als auch als Objekt von Handlungen auftreten können.

8.2 Systeme von Handlungsregeln

Es ist derzeit noch ungeklärt, wie die Strukturlemente einer soziale Entität beschaffen sind. Bekannt ist, dass Strukturlemente genutzt werden, um die soziale Welt *gefiltert* – um nicht zu sagen: zielgerichtet – zu beobachten und Handlungen zu generieren, und dass sie Gegenstand von Anpassungsprozessen sind. Wir konkretisieren dies, indem wir Strukturelemente als *Handlungsregelwerke* darstellen.

Ein Handlungsregelwerk kodiert die Grundstruktur, die den sozialen Prozess erzeugt. Man kann auch von der Handlungslogik oder von ihrer Grammatik sprechen. Jedes Handlungsregelwerk kodiert dabei den sozialen Prozess aus Sicht der jeweiligen Entität. Alle sozialen Aktivitäten des Handlungskomplexes werden von der Entität durch dieses Handlungsregelwerk betrachtet, so dass einige sozialen Aktivitäten ausgeblendet oder umgedeutet werden. Der sozialen Prozesse wird für jede Entität erst durch das Handlungsregelwerk subjektiv *konstruiert*. Insbesondere werden damit die Entitäten der Umwelt festgelegt. Diese Konstruktion der Entität/Umwelt-Konstruktion betrifft sowohl die Zukunft als auch die Vergangenheit, legt also auch die Handlungsmöglichkeiten (bzw. den Korridor der Handlungsmöglichkeiten) fest. Wie das Handlungsregelwerk angepasst werden kann, ist ebenfalls im Regelwerk festgelegt. Das Regelwerk bezieht sich also auf sich selbst, ist also reflexiv. Die Wahl von Handlungsregelwerken als zentralem Konstrukt trifft somit – wie oben ausgeführt – den Kerngehalt der zuvor betrachteten Theorien.

Handlungsregelwerke, und damit auch Entitäten, besitzen – in Abhängigkeit ihrer Verwendung – verschiedene Facetten. Handlungsregelwerke wirken handlungserzeugend. Betrachtet man die durch das Handlungsregelwerk generierte Dynamik, so erscheint eine Entität als sozialer Prozess. In diesem Sinne stellen Handlungsregelwerke spezielle soziale Strukturen dar, nämlich die unreflek-

tierten. Daneben sind Handlungsregelwerke aber auch noch Gegenstand anderer Handlungsregelwerke, was sie als reflektierte soziale Struktur kennzeichnet. Gleichzeitig erscheinen Handlungsregelwerke aber auch als Akteur, wenn man hervorhebt, dass sie handlungserzeugend wirken.

Welche Facette einer Entität wirksam wird, ist abhängig von der momentanen, subjektiven Zuschreibung der Entitäten. Erst durch das Behandeln als Struktur, Prozess oder Akteur erscheint eine Entität eben genau in dieser Facette, die durch das Behandeln real wird.

Jedes Handlungsregelwerkes ist für die jeweilige Entität dabei sowohl Erklärungs- als auch Prognosemodell. Die Verwendung eines Handlungsregelwerkes motiviert sich aus dem Bestreben der Akteure, die Außenwelt zu ordnen und mit dieser Ordnung prognostizierbar und damit beherrschbar zu gestalten. Mit Popitz bestimmt also der Wunsch nach Erwartungs-/Orientierungssicherheit die gliedernde Wahrnehmung der Umwelt. Akteure – gleich welcher Art – streben weiterhin danach, die Abweichungen von realen und erwarteten Aktionen zu minimieren. Dazu stehen ihnen die Methoden des Ausblendens von Umweltaspekten sowie des Kontrollierens und Sanktionierens ihrer Umwelt zur Verfügung. Bourdieu betont an dieser Stelle die selektierende Funktion des Habitus in der Wahrnehmung der Akteure in ihrem Kampf um Symbole. Jeder Kampf ist dabei auch ein Kampf um die Passung der Interpretationen und Erwartungen. Gleiches findet sich bei Elias in Form von Kontrolle der normativen Erwartungen und bei Popitz in der Darstellung zur Bildung von Verhaltensregelmäßigkeiten.

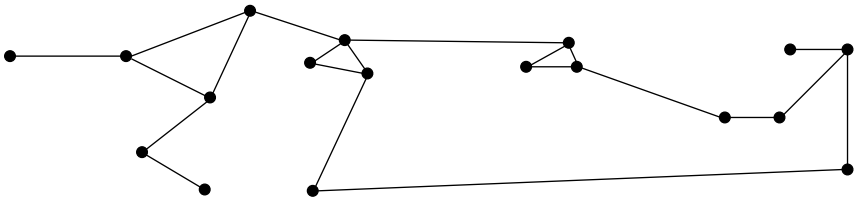


Abbildung 8.4: Ein Handlungskomplex

Im folgenden konzeptionaliseren wir Entitäten formal. Handlungskomplexe formalisieren wir als eine Menge H von Handlungsthemen. Jedem *Handlungsthema* $h \in H$ wird eine *Handlungslogik* $L(h) \in \mathcal{L}$ zugeordnet, wobei $\mathcal{L}$ die Menge aller Logiken ist. Besteht keine Gefahr der Verwechslung, so werden wir sowohl das Thema als auch die Logik nur kurz als *Handlungsregel* bezeichnen. Die Handlungsthemen stehen miteinander in Relation. Dies fomalisieren wir als binäre Relation $R \subseteq H^2$. Hierbei bedeutet $(a, b) \in R$, dass sich das Handlungsthema a auf b bezieht.

Definition 8.1 *Eine* Handlungskomplex (H, R) *besteht aus einer Menge von Handlungsthemen H, die mit der Relation $R \subseteq H^2$ in Bezug gesetzt werden.*

Eine Handlungsregelwerk $HRW = (H, R, L)$ *besteht aus einem Handlungskomplex (H, R) und der Handlungslogik $L : H \to \mathcal{L}$.*

Eine Entität E ist eine Teilmenge von Handlungsregeln, d.h. $E \subseteq H$. Entitäten definieren somit Grenzlininien zwischen dem System (d.h. der Menge E) und der Umwelt (d.h. der Menge $H \setminus E$). Nicht jede Teilmenge E eines Handlungsregelwerks H konstituiert eine Entität, da die Grenzziehung nicht qualitativ von R abhängig ist, sondern auch quantitativ von der Stärke der Relation. Entitäten sind mehr oder weniger operational abgeschlossene Einheiten, insofern als ihre Binnenkopplung viel größer als die externe ist. Um diese quantitativen Effekt zu modellieren, definieren wir das Konzept des *Entitätensystems*, das aus einer Familie von Teilmengen $\mathcal{E} \subseteq 2^H$ besteht.[4]

Definition 8.2 *Ein* abstraktes Entitätensystem $(H, R, L, \mathcal{E})$ *zum Handlungsregelwerk* (H, R, L) *besteht aus einer Familie von Teilmengen* $\mathcal{E} \subseteq 2^H$. *Jedes Element* $E \in \mathcal{E}$ *wird als* Entität *bezeichnet.*

Das Entitätensystem wird abstrakt genannt, da es aus der Perspektive eines fiktiven objektiven Beobachter formuliert ist. Weiter unten betrachten wir auch eine subjektiv formulierte Variante der Entitätensysteme.

Das Handlungsregelwerk kann für dieses Modell als universell gelten, während das Entitätensystem $\mathcal{E}$ als dynamische Größe $\mathcal{E}(t)$ betrachtet wird. Ist also (H, R, L) klar, so wird das soziale System allein durch das Entitätensystem $\mathcal{E}$ charakterisiert.

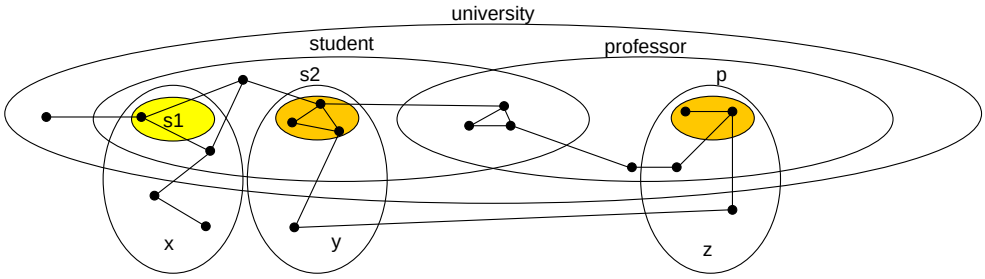


Abbildung 8.5: Ein Entitätensystem

Abbildung 8.5 zeigt ein Entitätensystem. Das dargestellte Handlungssystem *university* setzt sich aus den Systemen *student* und *professor* zusammen. (Wir können uns diese beiden Systeme grob als Rollen übersetzen.) Die Entität *student* hat als echte Teile s_1 und s_2, *professor* hat als echten Teil p. Die Systeme s_1, s_2 und p können wir uns als Akteure vorstellen, die die Rollen *student* bzw. *professor* einnehmen. Die Akteure x, y und z besitzen aber auch noch andere Rollen in sich, was durch die außerhalb von *university* liegenden Elemente angedeutet wird. Die Bezüge sind also nicht exklusiv. So ist das Rollensystem s_1 Teil vom Akteur x und gleichzeitig Teil von *student*.

[4] Alternativ wäre es auch denkbar, anstelle einer Relation R und der Familie von Teilmengen $\mathcal{E}$ ein Abstandsmaß d auf der Menge H zu definieren, das die thematische Nähe beschreibt. Da man annehmen kann, dass ein solches Maß symmetrisch und positiv definit ist sowie die Dreiecksungleichung erfüllt, würden wir in diesem Fall H als topologischen Raum betrachten.

Aus der Definition von $\mathcal{E} \subseteq 2^H$ folgt, dass nicht jede Teilmenge E der Handlungsregeln H konstituiven Charakter besitzt, d.h. im allgemeinen gilt für alle E auch $E \in \mathcal{E}$. Außerdem ist klar, dass Entitäten im allgemeinen wiederum aus Entitäten zusammengesetzt sind. Das Modell ist also rekursiv, da Entitäten sich aus anderen Entitäten konstituieren.[5] Die Rekursion ergibt sich anhand der Mengenüberschneidungen der Entitäten. In dem Beispiel besteht die setzt sich das System *university* aus den Systemen *student* und *professor* zusammen, die ihrerseits sich wiederum aus Systemen zusammensetzen.

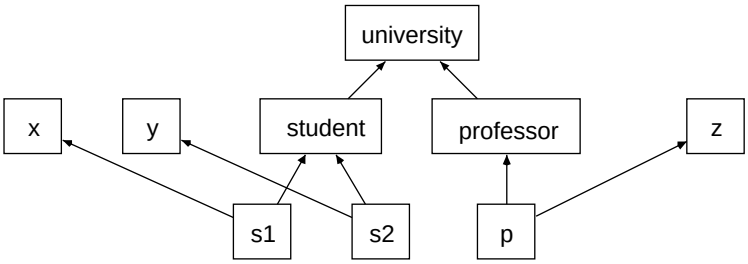


Abbildung 8.6: Ein Handlungsregelwerk

Sind wir nur an den Beziehungen der Entitäten interessiert, so bietet sich eine Darstellung wie in Abbildung 8.6 an, die nur die Struktur des Entitätensystems zeigt. Die Inklusionsbeziehungen zwischen den Entitäten sind durch die Pfeile dargestellt.

8.2.1 Globale versus lokale Sicht

Man beachte, dass in diesem Modell die Gesamtheit aller Entitäten auf globale Weise als Menge $\mathcal{E}$ modelliert wird. In der feineren Betrachtung wird analysiert, welche Entität von welcher anderen Entität lokal sozial als solche behandelt wird. Dazu weisen wir jeder Entität E dem Ausschnitt $\mathcal{E}_E \subseteq \mathcal{E}$ des Gesamtsystems zu, der allen Entitäten enthält, die E als solche wahrnimmt.

Analoges gilt für die Handlungslogik. Enthalten zwei Entitäten E_1 und E_2 beide das Handlungsthema h, d.h. $h \in E_1 \cap E_2$, dann bedeutet dies, dass sie beide eine Handlunsglogik bezüglich h besitzen. Dies bedeutet aber nicht, dass sie beide auch die *gleiche* Handlunsglogik bezüglich h besitzen müssten. Unterschiedliche Entitäten können die Logik $L(h)$ unterschiedlich ausgestalten. Dies drückt sich formal dadurch aus, dass die Handlungslogik in Abhängigkeit von E zugeordnet wird, d.h. die Handlungslogik dere Entität E ergibt sich mittels der Abbildungsfamilie $(L_E : E \to \mathcal{L})_{E \in \mathcal{E}}$ zu $L_E(h)$.

Definition 8.3 *Ein* Entitätensystem *ist das Tupel*

$$ES = \big(H, R, \mathcal{E}, (\mathcal{E}_E \subseteq \mathcal{E})_{E \in \mathcal{E}}, (L_E : E \to \mathcal{L})_{E \in \mathcal{E}}\big)$$

[5] Das Systemmodell besitzt in seiner rekursiven Konzeption erstaunliche Parallelen zu der Forschungsperspektive der soziologischen Systemtheorie nach Parsons und Luhmann.

Hier gilt analog, dass der Handlungskomplex für dieses Modell als universell gelten kann, während das Entitätensystem $\mathcal{E}$, die subjektive Wahrnehmung $(\mathcal{E}_E)_{E\in\mathcal{E}}$ und die Handlungslogiken $(L_E)_{E\in\mathcal{E}}$ als dynamische Größen $\mathcal{E}(t)$, $(\mathcal{E}_E(t))_{E\in\mathcal{E}}$ und $(L_E(t))_{E\in\mathcal{E}}$ betrachtet werden.

Für ein gegebenes Entitätensystem *ES* definiert jede Entität $E \in \mathcal{E}$ ein Handlungsregelwerk, das entsteht, indem man (H, R) auf E einschränkt und die Handlungslogik L_E hinzufügt:

$$HRW_{ES}(E) := (H \cap E, R \cap (E \times E), L_E) \tag{8.1}$$

Jede Entität E eines Entitätensystems kann mit dem Handlungsregelwerk $HRW_{ES}(E)$ identifiziert werden. Um den besonderen Charakter des Handlungsregelwerks $HRW_{ES}(E)$ zu betonen, bezeichnen wir es als *Handlungsregelsystem*.

Ein Entitätensystem heißt *selbstwahrnehmend*, wenn sich jede Entität selbst als solche behandelt:

$$\forall E \in \mathcal{E} : E \in \mathcal{E}_E \tag{8.2}$$

Unter der Voraussetzung, dass jede Entität sich selbst als solche behandelt, d.h. (8.2) gilt, folgt dann, dass sich das globale Modell $\mathcal{E}$ als die Vereinigung aller lokalen Sichtweisen $\mathcal{E}_E$ ergibt.

Theorem 8.4 *Für selbstwahrnehmende Entitätensysteme gilt* $\bigcup_{E\in\mathcal{E}} \mathcal{E}_E = \mathcal{E}$.

Beweis: Mit $E \in \mathcal{E}_E$ folgt $\bigcup_{E\in\mathcal{E}} \mathcal{E}_E = \bigcup_{E\in\mathcal{E}} \{E\} = \mathcal{E}$. q.e.d.

Dies erlaubt aber immer noch Entitätensysteme, in denen alle Entitäten im Extremfall nur sich selbst und sonst keine weiteren Entitäten als solche behandeln. Der andere Extremfall besteht darin, dass alle Entitäten identische Wahrnehmung besitzen. Ein Entitätensystem, bei dem alle Enitäten identisch wahrnehmen bezeichnen wir als *homogen*. Formal:

$$\forall E_1, E_2 \in \mathcal{E} : \mathcal{E}_{E_1} = \mathcal{E}_{E_2} \tag{8.3}$$

Theorem 8.5 *Für ein selbstwahrnehmendes, homogenes Entitätensystem fällt die lokale Sichtweise der Entitäten mit der globalen zusammen, d.h.* $\mathcal{E}_E = \mathcal{E}$ *für alle* $E \in \mathcal{E}$.

Beweis: Gäbe es nämlich eine Entität E_1, die von E_2 nicht als solche behandelt wird, d.h. $E_1 \notin \mathcal{E}_{E_2}$, dann gilt wegen der Homogenität (8.3) auch $E_1 \notin \mathcal{E}_{E_1}$ – ein Widerspruch zur Annahme der Selbstwahrnehmung. q.e.d.

Eine stärkere Eigenschaft ist die der Übereinstimmung der Handlungslogiken. Ein Entitätensystem, bei der alle Handlungslogiken L_E auf gemeinsamen Themen identisch sind, nennen wir *harmonisch*. Formal:

$$\forall E_1, E_2 \in \mathcal{E} : \forall h \in (E_1 \cap E_2) : L_{E_1}(h) = L_{E_2}(h) \tag{8.4}$$

Fassen wir diese drei Eigenschaft zusammen, so stellen wir fest, dass für selbstwahrnehmende, homogene und harmonische Entitätensysteme

$$ES = \big(H, R, \mathcal{E}, (\mathcal{E}_E)_{E\in\mathcal{E}}, (L_E)_{E\in\mathcal{E}}\big)$$

die subjektive und die objektive Perspektive zusammenfallen, d.h. *ES* entspricht gerade dem abstrakten Entitätensystem $(H, R, L, \mathcal{E})$, denn aufgrund der Homogenizität fällt die lokale Sichtweise $\mathcal{E}_E$ jeder Entität E mit der globalen $\mathcal{E}$ zusammen, und aufgrund der Harmonie sind die Handlungslogiken $L_E(h)$ aller Entitäten E identisch, so dass wir $L(h) := L_E(h)$ für eine beliebige Entität E definieren können.

8.2.2 Abgeschlossene Entitätensysteme

Die Aggregation der Entitäten innerhalb eines Entitätensystems ist nicht exklusiv, d.h. ein Handlungsregelsystem kann Teil verschiedener anderer Handlungsregelsysteme sein. Es ist also möglich, dass sich die Systeme überschneiden.[6] Untersuchen wir daher im folgenden die Charakterisierung von abgeschlossenen Handlungsregelsystemen.

Definition 8.6 *Eine Entität $E_0 \in \mathcal{E}$ heißt* geschlossen *in $\mathcal{E}$, wenn gilt:*

$$\forall E \in \mathcal{E} : E \cap E_0 \neq \emptyset \Longrightarrow E \subseteq E_0 \tag{8.5}$$

Ein Entitätensystem heißt geschlossen*, wenn jede Entität $E \in \mathcal{E}$ Teilmenge einer geschlossenen Entität $E_0 \in \mathcal{E}$ ist.*

Das Entitätensystem aus Abbildung 8.5 ist nicht geschlossen, denn *student* ist dies nicht, denn *student* und x überlappen sich in s_1, sind aber nicht Teil einer gemeinsamen Obermenge. Analoges gilt für *professor* und z.

Sei eine Entität $E_0 \in \mathcal{E}$ gegeben. Schränken wir $\mathcal{E}$ auf alle Teilmengen von E_0, so erhalten wir mit $\mathcal{E}_0 := \mathcal{E} \cap 2^{E_0}$ das Entitätensystem $ES(E_0)$:

$$ES(E_0) := \left(H \cap E_0, R \cap E_0^2, \mathcal{E}_0, (\mathcal{E}_E)_{E \in \mathcal{E}_0}, (L_E)_{E \in \mathcal{E}_0}\right) \tag{8.6}$$

Dieses System wird *Abschlußsystem* genannt. Es bezieht sich im allgemeinen nur noch auf einen Teil der Handlungsregeln. Dafür ist es aber abgeschlossen:

Theorem 8.7 *Sei ein Entitätensystem ES und eine Entität $E_0 \in \mathcal{E}$ gegeben, dann ist $ES(E_0)$ geschlossen.*

Beweis: Jede Entität $E \in \mathcal{E}(E_0)$ ist nach Konstruktion eine Teilmenge von E_0, und damit gilt auch $E \cap E_0 \neq \emptyset \Longrightarrow E \subseteq E_0$, also ist E_0 geschlossen. q.e.d.

Mit Hilfe des Entitätensystems $ES(E_0)$ ist es möglich, sich auf ein soziales System zu konzentrieren, dass bezüglich des Handlungsregelsystems E_0 abgeschlossen ist. Abbildung 8.7 zeigt das aus Abbildung 8.5 generierte System $ES(\mathit{student})$, also den Systemausschnitt, den man erhält, wenn man sich nur auf die studentischen Aspekte des gesamten Handlungsregelwerks, d.h. auf $E_0 = \mathit{student}$ und das Handlungsregelsystem $HRW_{ES}(E_0)$ bezieht.

Die Darstellung wird übersichtlicher, wenn wir wie in Abbildung 8.6 nur die Inklusionsbeziehungen zwischen den Entitäten illustrieren. Für diese Darstellungsform ergibt sich das bezüglich des Handlungsregelsystems E_0 abgeschlossene Entitätensystems $ES(E_0)$ wie in Abbildung 8.8.

[6] Hier zeigen sich Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede zum Holonenkonzept der VKI. Der Aufbau eines Holons ähnelt dem des Entitätensystem, insofern als dass sich ein Holon

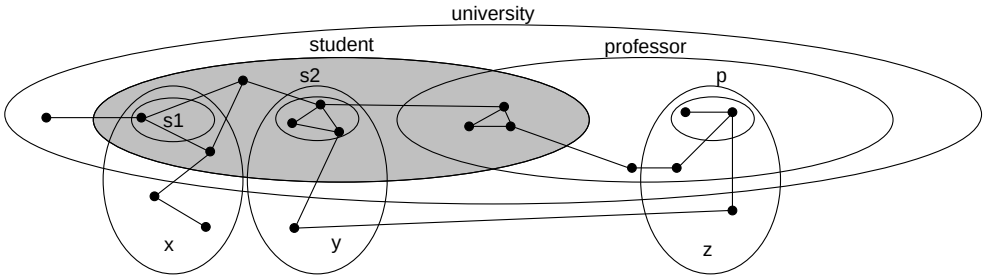


Abbildung 8.7: Das Abschlußsystem $ES(student)$

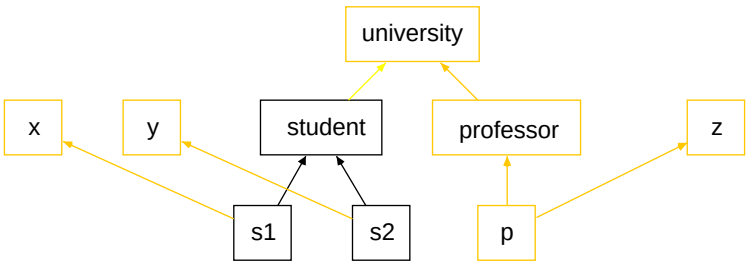


Abbildung 8.8: Das Entitätensystem $ES(student)$

Für die meisten empirisch relevanten Betrachtungen gibt es stets ein dominantes Thema. Daraus ergibt sich eine dominate Entität E_0 und als Analyserahmen das abgeschlossene Entitätensystem $ES(E_0)$. Es ist dann meist praktisch, sich nur auf die Analyse von $ES(E_0)$ zu beschränken, wenngleich dies auch die Gefahr birgt, dass man dann unangemessen von relevanten Bezüge innerhalb des Gesamtsystem abstrahiert.

8.3 Autopoiese als rekursive Erzeugung von Handlungsregeln

Die Selbstähnlichkeit in der Sozialtheorie korrespondiert zu einer *Rekursivität* in der sozionischen Modellierung. Die Rekursivität erlaubt es, die sich ausbildenen Relationen zwischen Entitäten wiederum als Entität aufzufassen, denn die Relationen von Handlungsregeln stellen wiederum welche dar. Auf diese Weise kann gleichermaßen etwas Neues im System entstehen (im Sinne einer neuen Systemqualität), ohne dass diese Form der Emergenz auch neue Modellbasiselemente erforderte. Das emergente Erzeugen neuer Strukturen geschieht durch die Grenzziehung, beispielsweise beim Übergang eines nicht operational abgeschlossenen Handlungsregelwerks hin zu einem geschlossenen, wodurch ein neues Handlungssystem entsteht.

Die emergente Dynamik eines Systems von Entitäten lässt sich am besten

wiederum aus Holonen zusammensetzt. Der Unterschied besteht darin, dass für Holone Aggreation und Delegation exklusiv ist.

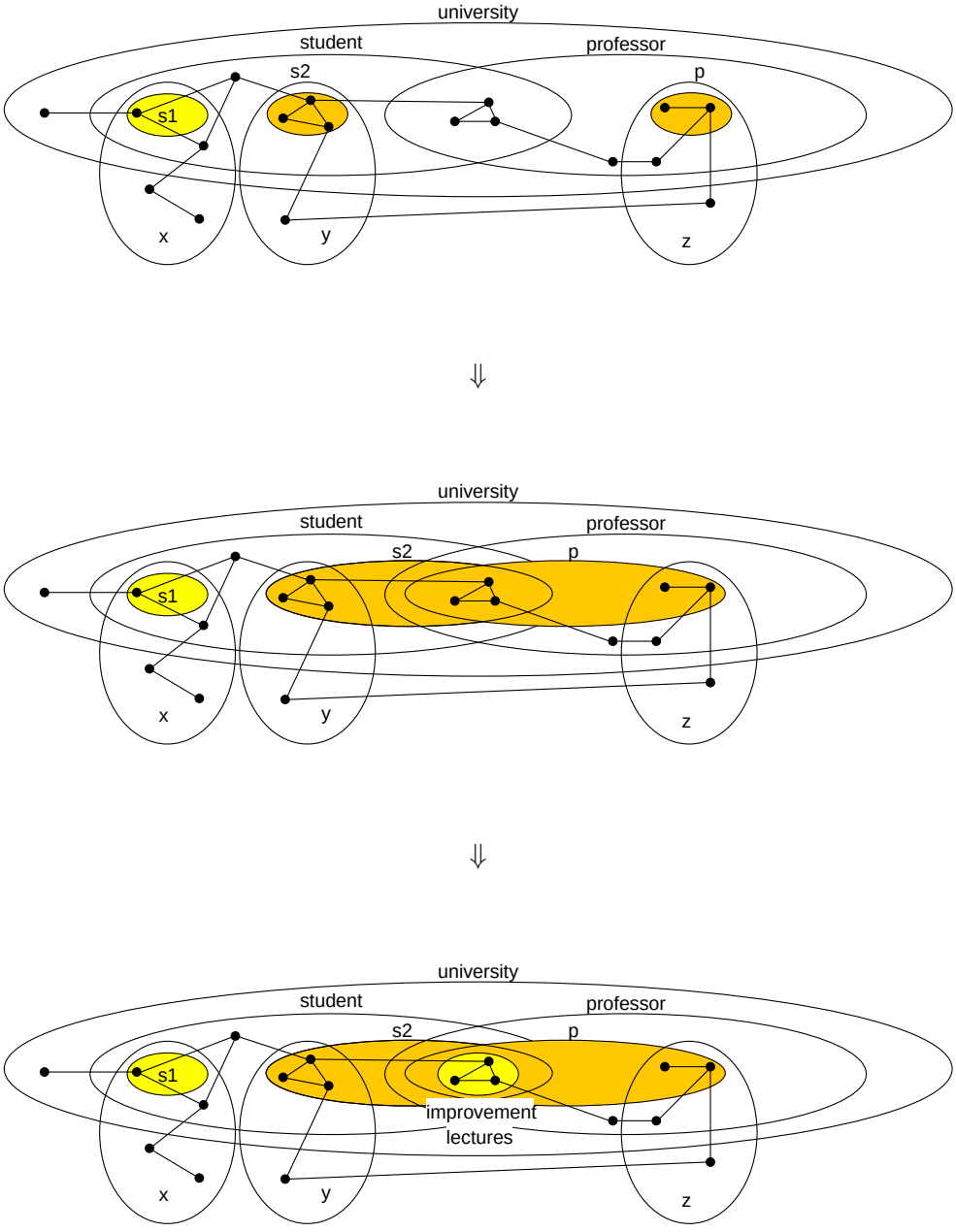


Abbildung 8.9: Autopietische Genese von Handlungssystemen

anhand eines Beispiels verdeutlichen. Wir beschreiben die Dynamik einer Offizialisierung, gennauer: Die autopoietische Erzeugung eines Handlungssystems. Betrachten wir dazu noch einmal das Handlungssystem $\mathcal{E}(t)$ aus Abbildung 8.5. Wir betrachten einen sozialen Prozess, in dem die Handlungssysteme *student* und *professor* wechselwirken und zwar in Bezug auf die Verbesserung universitärer Lehre. Im Laufe des Prozesses verändern sich beide Handlungssysteme, indem sie in Bezug auf die Lehre Handlungsregeln ausbilden, die *student* und *professor* verbinden (vgl. Abbildung 8.9 mitte). Sobald diese Handlungsregeln sich soweit verändert haben, dass sie operational geschlossen sind, so sind sie nach Definition ein Handlungssystem. Das resultierende Handlungssystem $\mathcal{E}(t')$ ist unten in Abbildung 8.9 dargestellt.

Die Interaktionen der Systeme *student* und *professor* erzeugen also eine neue Entität, hier: *improvement of lectures*, welche die soziale Struktur des Diskussionsprozesses beider Entitäten beschreibt. Das Emergieren des neuen Systems geschieht hierbei als Leistung des Systems aus sich selbst heraus, sprich: autopoietisch. Die emergente Autopoiese neuer Strukturen entspricht der dynamischen Erzeugung einer neuen Entitäten als Folge der Systemdynamik.

An dieser Stelle wird besonders deutlich, dass es nicht der Akteur und auch nicht die Struktur ist, die primär im Vordergrund stehen. Es ist vielmehr der Charakter des Prozesses, der in beiden Elementen vorkommt, zu betonen. Diese Prozesse interagieren reflexiv miteinander, reproduzieren sich und erzeugen auch neue Interaktionsformen (vgl. dazu die Strukturierungsdynamik aus Kapitel 7). Die Agenten sind Träger dieser Interaktionsformen, wobei je nach Beobachter ein Agent als Akteur, als Organisationsstruktur usw. erscheint.

An dieser Stelle eine Anmerkung zur Granularität von Handlungsregelwerken: Man könnte den Eindruck gewinnen, dass Handlungsregelwerke eine gröbere Granularität besitzen als individualistische Ansätze. Dies ist aber falsch, denn Handlungsregelwerke besitzen eine Granularität quer zu den Akteuren. Einerseits besitzen Handlungsregelwerke das Potential, überindividuelle Konstrukte (wie Normen, Institutionen usw.) zu erfassen, sind also abstrakter als Akteure, ohne dabei weniger real zu sein. Die Granularität umfasst also bereits Akteurskonstellationen. Andererseits geht die Auflösung auch unter die Granularität von Akteuren, denn ein Akteur bildet zwar in natürlicher Anschauungsweise ein in sich abgeschlossenes Handlungsregelwerk, stellt aber mitnichten das kleinstmögliche dar. Dies leuchtet sofort ein, denkt man an Kapitel 5 zurück: Ein Akteur ist Träger verschiedener Rollen, die im allgemeine noch nicht einmal konfliktfrei integriert sind. Da die Rollen des Akteur in sich abgeschlossene Handlungsregelwerke sind, ist der Akteur also bereits ein zusammengesetztes Systems. Auch andere Entitäten setzen sich nicht direkt zum menschlichen Akteur in Beziehung, sondern zu seinen abgeschlossenen Handlungsregelwerken. Wir halten also fest, dass der Akteur weder theoretisch noch im Modell als *Atom* des Sozialen betrachtet wird. Vielmehr ist es ein Element des sozialen, das sich anschaulich durch seinen (biologischen) Umweltabschluss auszeichnet, sozial aber eher eine mittlere Granularität besitzt. Diese Konsequenz halten wir mit folgendem Slogan fest:

Autopoiese von Koordination – statt von Agenten.

Man beachte, dass die Beschreibung der Dynamik sehr ökonomisch ist, verglichen mit einem individualistischen Ansatz. Der individualismus ist das Paradigma, nach dem Soziales auf die Interaktion von Individuen zurückzuführen ist, so dass die kernsoziologischen Beschreibungselemente wie Rollen, Normen, Institutionen etc. streng genommen nur den Charakter von Elementen zweiter Ordnung haben. Sie existieren nur in ihrer Repräsentation „im“ Individuum. Rollen, Normen, Institutionen usw. besitzen den ontologischen Status statistischer Größen. Der hier verfolgte Ansatz verleiht den soziologischen Kernelemente dagegen einen primären Status, indem er dagegen ins Zentrum der Betrachtung setzt. Hierdurch ist es möglich, Emergenz als Wechselwirkung von Stukturen zu begreifen, ohne den erklärungsökonomisch anstrengenden Umweg über die Individuen nehmen zu müssen.

8.4 Entitätensysteme als Agenten

Sei das Entitätensystem $\big(H, R, \mathcal{E}, (\mathcal{E}_E)_{E\in\mathcal{E}}, (L_E)_{E\in\mathcal{E}}\big)$ gegeben. Jede Entität $E \in \mathcal{E}$ ist eine handelnde Einheit, sie wird daher im folgenden als Agent modelliert. Diese Agenten besitzen ihren eigenen Ausschnitt $\mathcal{E}_E \subseteq \mathcal{E}$ des Gesamtsystems und ihre eigene Handlungslogik. Sie konstituieren ein eigenes Handlungsregelwerk, nämlich $HRW_{ES}(E) = (H_E, R_E, L_E)$.

Jedes Handlungsregelwerk $HRW_{ES}(E)$ wird durch das in Abbildung 8.10 dargestellte Petrinetz modelliert. Dieses Netz stellt einen Akteur dar – den SONAR-Agenten in seiner abstrakten Form. Dieser beschreibt die operationale Sicht auf das Handlungsregelwerk der Entität. Der Agent ist in der Lage, auf äußere Reize zu reagieren. Er rahmt den Reiz im Kontext des Handlungsregelwerks und überführt den aktuellen Handlungskorridor in eine Situation, die anzeigt, dass der Handlungskorridor angepasst werden muss. Diese Situation führt dazu, dass der Handlungskorridor mit Hilfe der zur Verfügung stehenden elementaren Handlungsmöglichkeiten nun exploriert wird, um einen neuen, adjustierten Handlungskorridor zu generieren. Diese Exploration ist dabei durch das Handlungsregelwerk gesteuert. Sowohl durch die Rahmung als auch durch die Generierung können sich neue Aspekte für das Handlungsregelwerk ergeben, die dann internalisiert werden. Der aktuelle Handlungsraum ist stets die Vorbedingung zu Handlungen des Akteurs. Eine Handlung verändert unter Umständen auch das Handlungsregelwerk.

Die Rekursivität des Modells sozialer Entitäten lässt sich in natürlicher Weise durch Referenznetze darstellen, da diese ebenfalls eine rekursive Struktur besitzen (Netze sind Marken von Netzen). Die Handlungsstrukturen jedes Entitätsnetzes sind wiederum durch eine Menge von Referenznetzen dargestellt. Diese Handlungsstrukturnetze besitzen die in Abbildung 8.6 dargestellten Referenzen auf andere Entitäten.[7]

[7] Mit Bourdieu gesprochen bilden die Referenzen auf andere Entitäten das Vermögen einer Entität.

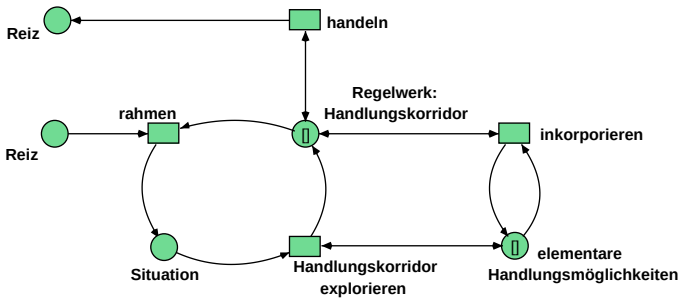


Abbildung 8.10: Schematisches Modell eines SONAR-Agenten

8.4.1 Eigenschaften von Handlungsregelwerken

Das Handlungsregelwerk kodiert die subjektive soziale Realität eines Agenten. Gleichzeitig beschreibt es sein Verhältnis zu allen anderen Agenten, zu deren Fähigkeiten etc. Es handelt sich dabei (a) um Relationen zwischen Entitäten in Form praktischer Anerkennung, (b) um das strukturelle Vermögen, das Entitäten besitzen, sowie (c) um die Symbole, durch die Anerkennung und Vermögen kommunizierbar werden.

Praktisches Anerkennen/Anerkannte Praxis

Handelt der Agent gemäß seines Regelwerks, so reagiert er im allgemeinen auf einen anderen Agenten. Seine Reaktion stellt eine Form der Anerkennung dieses Agenten dar, wobei dieser Anerkennungsprozess keine Bewertung ist, weder im positiven noch im negativen Sinne. Praktisches Anerkennen reproduziert die soziale Realität der so ausgezeichneten Entität.

SONAR-Agenten vollziehen diese Form der praktischen Anerkennung – ebenso wie die Internalisierung und die Kontrolle – auf der Ebene der Interaktionen. Das Bestehen einer Interaktion impliziert nämlich bereits das Anerkennen des Interaktionspartners.

Vermögensstrukturen/Strukturelles Vermögen

Handlungsstrukturen haben „Vermögenscharakter“, denn sie beschreiben, was andere Agenten vermögen. Dies umfasst nicht nur materielle Ressourcen, sondern auch immaterielle Formen, wie beispielsweise das Wissen um kulturelle Spielregeln – im Sinne der Sprechweise: Ein Akteur *vermag* sich richtig zu verhalten. Ebenso kodieren Handlungsstrukturen soziale Beziehungen, die wiederum Vermögen darstellen. Dies ähnelt dem Kapitalbegriff Bourdieus, der in den Formen des ökonomischen, sozialen, kulturellen und symbolischen Kapitals verwendet wird.

Das Vermögen eines Agenten besteht demnach aus ökonomischen Kapital in Form von Ressourcen, aber auch sozialem Kapital, in Form von vertrauten Beziehungen, und kulturellem Kapital, das durch die Protokolle beschrieben wird. Insbesondere Protokolle als prozedurales Wissen bilden eine Erweiterung zu den etablierten, an Faktenwissen orientierten Konzepten.

Symbolische Reflexion/Reflexive Symbolik

Wie bereits in der Erörterung des rekursiven Charakters sozialer Entitäten angesprochen, generiert die praktische Anerkennung Entitäten höherer Ordnung. Systeme höherer Ordnung sind nur mit Hilfe von Symbolsystemen generierbar, denn nur Symbole erlauben es, soziale Relationen zum Gegenstand der Interaktion zu machen. Ohne Symbole entsteht, wie beispielsweise in Ameisengesellschaften, zwar auch komplexes Verhalten, dieses ist jedoch prinzipiell endlich, das die Interaktionsformen aus einem endlichen Repertoire (abstrakt: einem Alphabet) entstammen. Erst ein reflexives Symbolsystemen erzeugt unendliche viele Interaktionsformen.

Neben der Möglichkeit zur Reflektion erlauben erst Symbole weitreichende, über Kleingruppen hinausreichende Strukturfestigung. Ohne Symbole ist jede Stabilisierung wechselseitiger Erwartungen auf die beständig wiederholte, erwartungskonforme Bestätigung der Struktur im *direkten* Kontakt erforderlich – eine Anforderung, die nur in Kleingruppen zu erfüllen ist. Im Kontext von symbolisch repräsentierten Erwartungshaltungen – wie beispielsweise Rollen, Titel, Verträge usw. – dagegen ist die Erwartungssicherheit größer, da alle auf dieses Symbolsystem angepassten Akteure mit ihrer „Investition“ in diese Symbole gewissermaßen haften. Außerdem ist es nicht notwendig, Symbole durch Interaktion aller mit allen zu reproduzieren, da der Gebrauch von Symbolen in seiner Sichtbarkeit beliebig multipliziert werden kann. Agenten der SONAR-Schicht kommunizieren daher in einem Symbolsystem, das Reflektion und damit die Generierung neuer Symbole erlaubt. Insbesondere das Erschaffen von Symbolen für übergreifende, aus mehreren Protokollen zusammengesetzte Handlungen sowie Symbole für die Bündelung von Erwartungen in Rollen sind hierbei zentrale Fähigkeiten.

8.4.2 Handlungsregelwerke sind implizite Kodierungen

Eine angemessene Umsetzung prominenter sozialtheoretischer Konzepte, wie beispielsweise Normen, liegt auf einer Ebene *unterhalb* der rationalen, denn das zentrale Movens der Akteure sind Konzepte wie das Über-Ich oder der Habitus, die gerade nicht rational oder planend sind, sondern inkorporiert im Akteur vorliegen und durch Ängste und Emotionen beeinflusst werden. Die Konzepte werden daher in diesem Modell nicht explizit dargestellt. Vielmehr besitzen Normen ihren Ausdruck in der Gesamtheit aller Verhaltensregeln des Agenten.

Dass Handlungsreln im Agenten symbolisch – und dadurch explizit – repräsentiert sind, steht hierzu nicht im Widerspruch, denn bei der Kodierung handelt sich um keine einer Reflexion unmittelbar zugänglichen Form, etwa in Form eines reflexiven Wissens. Zwar ist es dem Agenten möglich, von seinen Regeln auf die Normen zu schließen und diese somit explizit zu machen, aber dieser Vorgang der Selbstreflektion ist im allgemeinen aufwendig und geschieht nur in extremen Problemsituation und spielt daher für das soziale Handeln in Standardsituationen keine Rolle.

Ein normatives Handeln kommt nicht zustande, weil ein Akteur den Normen entsprechend handeln will, denn der Agent hat bei seinem Handeln keine

Repräsentation der Norm, vielmehr ist es so, dass der Agent im Laufe seines Handelns die Normen in Form von Handlungsregeln internalisiert hat, ohne sich dessen bewusst zu sein. Aus diesem Grunde ist jeder Ansatz, das Konzept der rationalen Agenten (Wooldridge, 2000) unmittelbar zu sozial-rationalen (auch: normativ-deliberative) Agenten zu erweitern (wie in Castelfranchi u. a., 1999) ungeeignet, da Normen nicht aufgrund von rationalen Planungsprozessen befolgt werden, sondern weil sie inkorporiert wurden. Anstatt normorientierte Handlungen durch *Obligations* oder *Commitments*, die explizit in den Planungsprozess involviert sind, zu modellieren, schlagen wir vor, diese durch Handlungsregeln im Sinne habitueller Präferenzen darzustellen, die die Handlungswahl des Agenten leiten, ohne dass er dies in der meisten Zeit reflektieren müsste.

Der Unterschied zwischen beiden Ansätzen zeigt sich deutlich durch die Tatsache, dass ein normativ-deliberativer Agent in der Lage ist, gegen die Normen zu verstoßen, wenn ihm der Regelverstoß mehr Vorteile als Nachteile verspricht. Dagegen kann der SONAR-Agent nicht entscheiden, gegen die Norm zu verstoßen, da er keine symbolisch reflexive Repräsentation von ihr besitzt. Er kann also normalerweise nicht anders, als *in* den Normen zu denken, nicht aber *über* sie.

8.4.3 Vergleich mit sozialen Praxisformen und Akteursmodellen

Entitäten modellieren Interaktionszusammenhänge. Sie haben daher weitreichende Gemeinsamkeiten mit den Praxis/Ordnungen der TSSO.

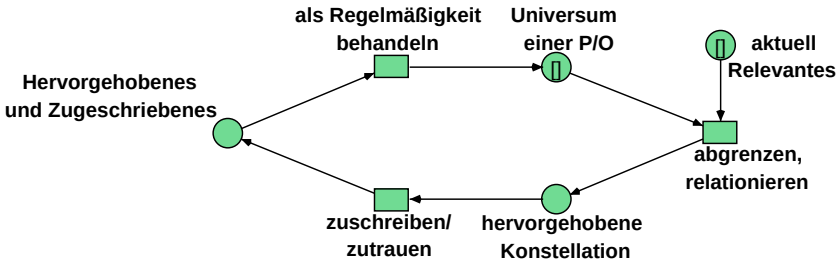


Abbildung 8.11: Grundstruktur der Konstitutionsdynamik einer Praxisordnung

Konkret erkennen wir dies daran, dass die abstrakte Grundstruktur des SONAR-Agenten aus Abbildung 8.10 strukturell der Konstitutionsdynamik einer Praxis/Ordnung ähnelt (Abbildung 8.11 ist eine Kopie der Abbildung 7.20, die wir hier der leichteren Lesbarkeit halber erneut eingefügt haben). Die strukturelle Übereinstimmung mit dem SONAR-Agenten ist direkt anhand der Modelle zu erkennen: In Abbildung 8.12 haben wir das Layout der Konstitutionsdynamik aus Abbildung 8.11 so verändert, dass die Übereinstimmung zur Grundstrukur des SONAR-Agenten in Abbildung 8.10 klar wird. Die Umgestaltung erfolgt so, dass inhaltlich korrespondierende Modellelemente an der gleichen Position in der Abbildung dargestellt werden. Die Modelle sind inhaltlich nahezu deckungsgleich.

Das Grundmodell des SONAR-Agenten aus korrespondiert zudem noch zum

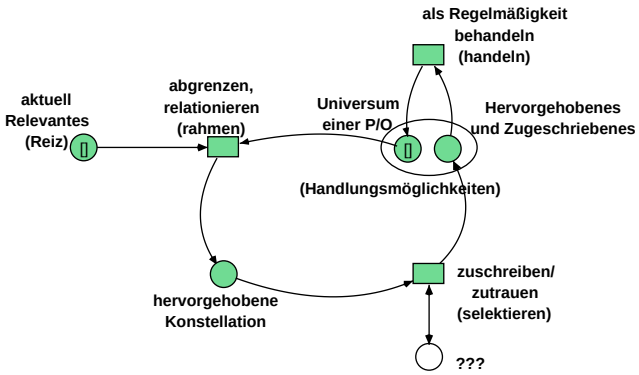


Abbildung 8.12: Strukturdynamik aus Abbildung 7.20, angepasst an die Darstellung des SONAR-Agenten aus Abbildung 8.10

allgemeinen Akteursmodell aus Kapitel 5. Wir können dies anhand der Übereinstimmungen mit dem allgemeinen Akteursmodell aus Abbildung 5.24 illustrieren. Auch hier erreichen wir nämlich durch eine Anpassung des Layouts eine graphische Deckungsgleichheit. Eine Einbettung des Schemas aus Abbildung 8.10 ist in Abbildung 8.13 dargestellt.

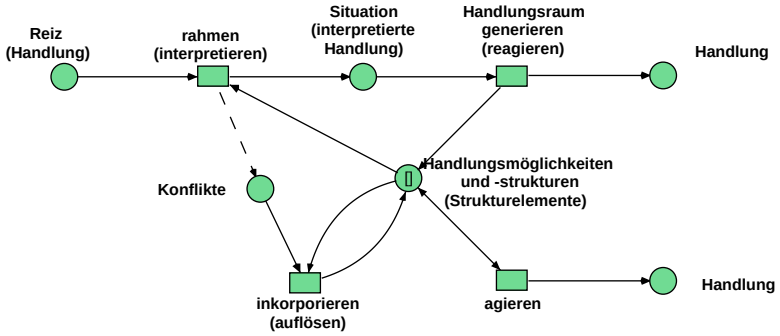


Abbildung 8.13: Der SONAR-Agent im Schema des Akteursmodell aus Abbildung 5.24

8.5 Modellierung sozionischer Agenten

Die betrachteten Systeme von Handlungsregeln stellen nach sozialwissentschaftlichem Verständnis eine „objektive“ Rekonstruktion des Sozialen dar, d.h. die Beschreibung ist so, wie sie sich einem Beobachter darstellt. Sie ist also insbesondere abhängig von den Interessen und Möglichkeiten des Beobachters.

Diese Rekonstruktionsperspektive stimmt dabei im allgemeinen nicht mit der Implementationsperspektive, d.h. der tatsächlichen Situation (sofern diese überhaupt existiert) oder der subjektiven Sicht der Akteure überein. Die Unterscheidung illustriert die sprichwörtliche *unsichtbare Hand des Marktes*, die dazu führt,

dass individuell eigensüchtiges Verhalten auf globaler Ebene das Allgemeinwohl mehrt. Die Biologie nimmt mit der Evolutionstheorie in ähnlicher Weise die Rekonstruktionsperspektive ein, wenn sie die Handlungen individueller Lebewesen als genetisches Optimierungsproblem modelliert, auch wenn klar ist, dass dies für das Individuum keine handlungsleitende Rolle spielt.

Es ist also ein Fehler von der Rekonstruktions- auf die Implementationsperspektive zu schließen, denn bezüglich des Verhaltens existieren im allgemeinen unendlich viele Modelle, die alle das gleiche Verhalten beschreiben, nämlich das der Rekonstruktionsperspektive. Somit ist nicht möglich, die Güte der Implementation anhand seiner Extension zu beurteilen. Wir müssen daher zusätzliche noch den internen Aufbau beurteilen und mit Ockhams Rasiermesser[8] das einfachste Modell heranziehen. Unser Kriterium der Einfachheit ist im folgenden die Modellkomplexität. Wir betrachten also nicht alle möglichen Modelle, sondern bevorzugen solche, die die Rekonstruktionsperspektive mit geringem Ressourceneinsatz (Zeit und Darstellungsplatz) leisten.

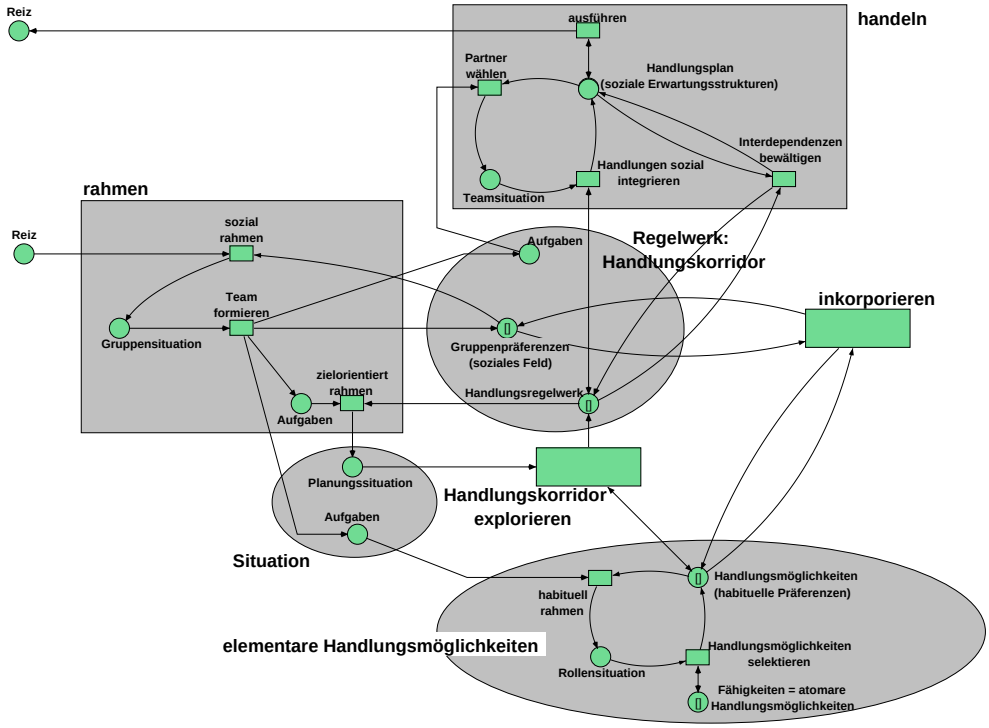


Abbildung 8.14: Verfeinerung des SONAR-Agenten aus Abb. 8.10

Wir betrachten im folgenden einen Agententyp, der die sozialen Entitäten realisiert. Wir verfeinern dazu das schematische Modell des SONAR-Agenten aus Abbildung 8.10, um Prozesse des Strukturgenese in Agenten (Internalisierung usw.) besser unterstützen zu können. Diese Verfeinerung ist in Abbildung 8.14 dargestellt. Verfeinert wird dabei die Struktur der elementaren Handlungsmöglichkeiten und die Aktivität des Handelns.

[8] Wilhelm von Ockham (1285 1350), engl. William of Ockham: Vertreter der Spätscholastik

Wir erkennen, dass die elementaren Handlungsmöglichkeiten (HM) ihrerseits eine interne Struktur haben und ihrerseits sich aus atomaren Handlungsmöglichkeiten zusammensetzen. Die Unterscheidung von elementaren und atomaren Handlungsmöglichkeiten ist dabei relativ zum Agenten getroffen. Atomar sind solche Handlungsmöglichkeiten, die im absoluten Sinne nicht weiter unterteilbar sind. Elementar sind dagegen solche Handlungsmöglichkeiten, die für die Exploration des Handlungskorridors nicht weiter unterteilbar sind. Ebenso ist die Aktivität des Handelns, die die Navigation innerhalb des Handlungskorridors übernimmt, nicht atomar. Handeln geschieht im Kontext *sozialer Erwartungsstrukturen* und der Agent muss seine Handlungen sozial integrieren.

8.5.1 Die Ebenen der Schichtenarchitektur

Analysiert man die Struktur der Verfeinerung in Abbildung 8.14, so stellt man fest, dass das Modell innere Symmetrien aufweist. Abbildung 8.15 hebt diese Symmetrien hervor. Die Symmetrien ergeben sich aus der Tatsache, dass beide Verfeinerungen die gleiche Grundstruktur wie das abstrakte Modell des SONAR-Agenten aus Abbildung 8.10 besitzen. Man erhält daher eine mehrschichtige Architektur.

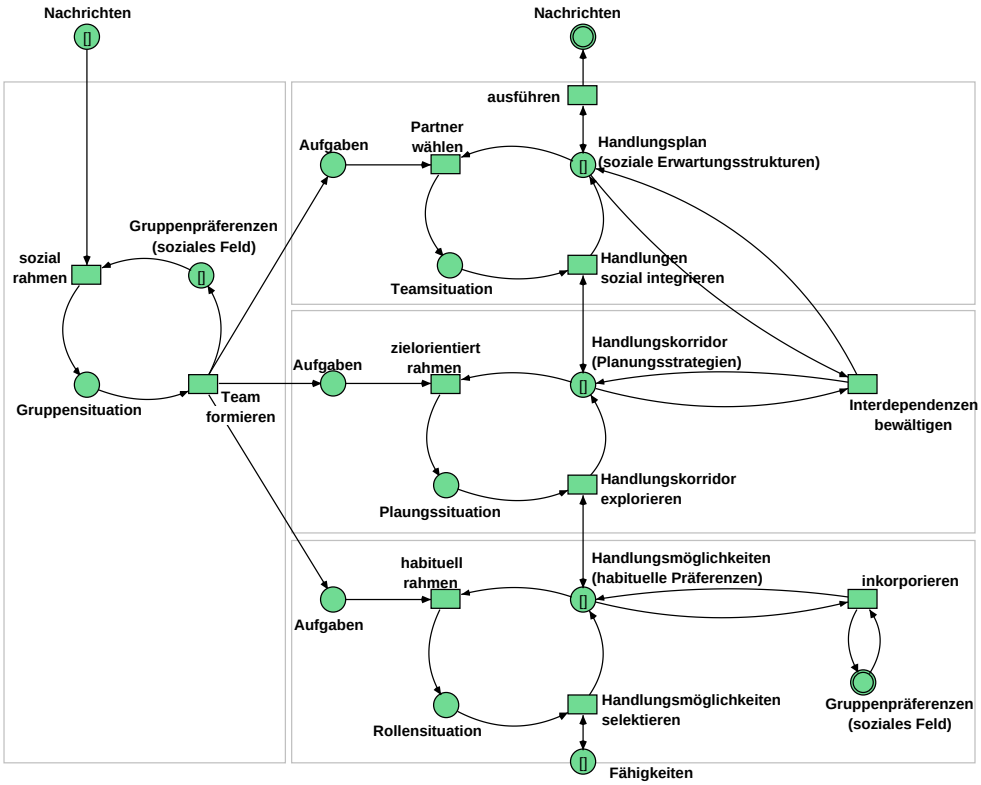


Abbildung 8.15: Geschichtetes Modell

Aus der Symmetrie der Module folgt, dass SONAR-Agenten bereits in sich strukturiert sind. Sie sind nämlich in Ebenen unterteilt, die für die verschiede-

nen Bezüge der Handlungswahl zuständig sind. Ein Agent besteht also Subakteuren, die einander erstens direkt zuarbeiten und zweitens die Strategien ihrer Handlungswahl ständig beeinflussen. Wir betrachten einen Agenten selbst als Organisationsform, der sich als Netzwerk von mehreren Handlungsregelwerken darstellt. Der einzige Unterschied zu einem „normalen“ Agenten ist die Tatsache, dass die Subagenten nicht mit Handlungen umgehen, sondern mit dem allgemeinen Konzept des *Möglichkeitsraums*. Die Aufteilung in mehrere Architekturschichten gestaltet den Koordinationsprozess effektiver. Soziale Interaktion besitzt zwei zentrale Aspekte: Zum einen die Formation des Teams und zum anderen die Interaktion im Rahmen der Teamstruktur. Der SONAR-Agent aus Abbildung 8.15 besitzt dazu ein Planungsmodul zur Teamformierung, drei Module zur Planung der Interaktion und zusätzlich zwei Metastrukturen, die reflexiv auf den Planern operieren. *Planer* dienen der strategiegesteuerten Exploration des Möglichkeitsraumes eines Dienstes. Berücksichtigt werden zum einen elementare Handlungsstrukturen und die Kompositionsoperatoren hierauf und zum anderen die Explorationssstrategien. Planer regeln das Verhalten der Transitionen:

- Team formieren
- Handlungsmöglichkeiten selektieren
- Handlungskorridor explorieren
- Handlungen sozial integrieren

Planer operieren auf dem aktuellen *Möglichkeitsraum*, der sich aus der Historie der bereits eingegangenen Nachrichten und den Planungsraum aller noch möglichen Kommunikation bestimmt. Im Modell sind dies die Stellen:

- Gruppenpräferenzen (soziales Feld),
- Handlungsmöglichkeiten (habituelle Präferenzen),
- Handlungskorridor (Planungsstrategien) und
- Handlungsplan (soziale Erwartungsstrukturen).

Planer reagieren auf äußere Signale, kontextualisieren diese in bezug auf den Möglichkeitsraum und adjustieren den Handlungsraum gegebenfalls neu. Die verwendeten Strategien eines SONAR-Agenten verbinden sich mit dem Zweck des sozialen Systems (z.B. einer Organisation).[9]

[9] Organisation werden oftmals durch eine zu erfüllende Aufgabe gekennzeichnet. Wir wir bereits gesehen haben, ist dieses Konzept sehr vage, da beispielsweise unklar ist, ob damit der offizielle Zweck der Organisation gemeint ist oder der objektive, d.h. dem Beobachter erschließendem Zweck oder lediglich Zweck des Selbsterhalts. Auch ist unklar, ob es sich bei dem offiziellen Zweck einer Organisation nicht um eine Rationalitätsfiktion handelt, bei der dem Bestehenden Sinn und Zweck einfach angedichtet wird.

Wir halten daher fest, dass wir – anlog zu unseren Ausführungen in Kapitel 5.4 – nicht vorausetzen, dass es so etwas wie einen absoluten Zweck der Organisation gibt oder dass die Organisation diesen erüllen müsste.

Die Prozesse der Kontextualisierung und der Adjustierung sind abhängig von Parametern, nämlich den atomare Handlungsmöglichkeiten (den Aufspannenden des Handlungsraumes) einerseits und den Adjustierungsstrukturen (habituelle Präferenzen, Strategien und soziale Erwartungsstrukturen) andererseits.

Meta-Planer dienen der Adaption und Reorganisation der Planer, indem sie die Planungsressourcen modifizieren oder ergänzen, beispielsweise indem Strategien angepasst, Handlungsroutinen erlernt, Agenten gegen andere ausgetauscht oder Koordinierungsregeln generiert werden. Es handelt sich um die beiden Transitionen:

- Interdependenzen bewältigen
- Inkorporieren

Zusammengefasst ergibt sich ein SONAR-Agent wie folgt (Eine mathematische Präzisierung erfolgt im nachfolgenden Abschnitt in Definition 10.23 auf Seite 406)

Definition 8.8 *Ein* SONAR-Agent *besteht aus folgenden Komponenten:*

1. *Fähigkeiten* ρ
2. *Gruppenpräferenzen* γ
3. *Verhaltensregelmäßigkeiten* Δ
4. *Planungsstrategie* δ
5. *Soziale Erwartungsstrukuren* π
6. *Inkorporierungsprozedur* β_1
7. *Interdependenzbewältigungsprozedur* β_2

Die Aufgaben der Ebenen der Schichtenarchitektur teilen sich anhand ihrer Kernelemente nach Verhaltensregelmäßigkeiten, Planung, und soziale Strukturen auf. In Anlehnung an die Nomenclatur der VKI sprechen wir auch von der reaktiven, der deliberativen und der sozialen Schicht. Betrachten wir diese im Detail.

Verhaltensregelmäßigkeiten

Auf der untersten Ebene werden die Verhaltensregelmäßigkeiten des Agenten verwaltet und der mittleren Schicht zur Verfügung gestellt. Die Verhaltensregelmäßigkeiten (VR) setzen sich aus atomaren Handlungen zusammen, können daher einen sehr komplexen internen Aufbau besitzen.

Die Besonderheit dieser Ebene ist, das bei der Handlunsgauswahl keine Refelexion über die Handlungsmöglichkeiten erfolgt. Dem Agenten erscheinen die Verhaltensregelmäßigkeiten daher als Atome, die keine innere Struktur besitzen

Die eingehende Nachricht wird von den habituellen Präferenzen gerahmt. Rahmen bedeutet, dass die „nackte“ Nachricht in einen subjektiven Kontext des

Agenten gestellt wird, wodurch die Nachricht ihren Charakter erhält. Durch die Rahmung werden auch Aspekte, die mit der Nachricht verbunden sind, ausgeblendet oder hervorgehoben. Naturgegebenermaßen steht der subjektive Bezug des Empfängers in keinem direkten Bezug zu dem des Senders.

Die habituellen Präferenzen geben an, welche Verhaltensregelmäßigkeiten der Planungsebene als Handlungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Dies geschieht durch die Transition Handlungsmöglichkeiten selektieren.[10] Hierbei sind die Handlungsmöglichkeiten nicht funktional festgelegt, sondern sind mitunter vielfältig, d.h. zur einer Situationen sind mehrere Verhaltensregelmäßigkeiten passend, so dass mehrere Handlungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

Es ist jedoch möglich, dass sich die habituellen Präferenzen im Laufe der Aktivität ändern. Dies geschieht durch das Inkorporieren, bei dem – ausgelöst durch die darüberliegende Schicht – habituellen Präferenzen verändert werden können. Eine Veränderung der habituellen Präferenzen impliziert eine Veränderung der Verhaltensregelmäßigkeiten. Eine Veränderung ist an dieser Stelle möglich, da sich die Verhaltensregelmäßigkeiten aus atomaren Aktionen zusammensetzen. Der Prozess des Inkorporierens muss also ein reflexives Bewusstsein über die Verhaltensregelmäßigkeiten erzeugen, um sich den inneren Aufbau der Verhaltensregelmäßigkeiten zu vergegenwärtigen und sie dann anpassen zu können. Da dies aufwendig ist, handelt es sich beim Inkorporieren um eine zeitintensive Aktivität.[11]

Planung

Die zweite Ebene ist für die individuelle Planung zuständig. Der Agent ist zielverfolgend. Auch der Planungsprozess erhält die Nachricht, um sie zu rahmen. Die Nachricht wird dabei durch die Planungsstrategien in den Kontext der aktuellen Planung gesetzt, indem beispielsweise überprüft wird, ob die aktuelle Situation noch mit früheren Annahmen übereinstimmt.

Planungsstrategien sind Heuristiken, die die Exploration des Suchraumes steuern. Dabei kann es sich beispielsweise Makropläne handeln, die den Planungsprozess flankieren, indem sie „Etappenziele“ festlegen. Der Suchraum wird also anhand des Wissens, der Ziele und der Strategien exploriert. Die Exploration hat dabei nicht zum Ergebnis, einen eindeutigen Ablaufplan zu generieren. Vielmehr wird durch die Exploration des Planungsraumes ein Handlungskorridor generiert, der es der darüberliegenden Schicht ermöglicht, solche Optionen zu realisieren, die zum sozialen Kontext passen.[12]

Die Schwierigkeit bei der Planung im MAS-Kontext besteht darin, dass im allgemeinen die Handlungen des einzelnen mit denen der anderen interferieren. Da die anderen Akteure nicht direkt gesteuert werden können, ergibt sich hierdurch eine hohe Erwartungsunsicherheit. Hiermit verbunden ist ein größerer Planungsaufwand, um dass Risiko eigener Aktionen abschätzen zu können.

Wie bereis erwähnt, können Strategien, die sich besonders bewähren und die

[10] Dies entspricht dem praktisches Anerkennen der Normen nach Elias, der Verwendung des Kapitals nach Bourdieu und auch den Verhaltensregelmäßigkeiten nach Popitz.

[11] Siehe dazu die Ausführungen Bourdieus zum Kapital und die Elias' zur Internalisierung.

[12] Handlungskorridor entsprechen somit grob den „partial global plans“ des PGP-Protokolls.

ständig routinehaft wiederholt werden, durch Inkorporationsprozesse zu Verhaltensregelmäßigkeiten werden. Dies hat zur Folge, dass der Planungsebene nur solche Handlungsmöglichkeiten angeboten werden, die auf die Planungsstrategien hin abgestimmt sind.[13] Dies heißt insbesondere, dass Handlungsmöglichkeiten, die nicht zu den Strategien passen, im Laufe der Zeit ausgeblendet werden können, dem Agenten also gar nicht mehr als Möglichkeit bewusst werden.

Die Strategien können von der oberen Ebene beeinflusst werden. Die Transition Interdependenzen bewältigen reagiert beispielsweise auf Rollenkonflikte auf der sozialen Ebene, indem die Strategien angepasst werden. Dies ist analog zum Prozess des Inkorporierens sehr aufwendig, da erst ein reflexives Bewusstsein über die Strategien erstellt werden muss.

Soziale Interaktion

Die dritte Ebene rahmt die Nachricht im Kontext der sozialen Erwartungstrukturen, worunter insbesondere Rollen, Institutionen oder Normen fallen. Technischer gesprochen handelt es sich um Formen der Koordinierung, die gemeinsame Übereinstimmung und wechselseitige Festlegung erfordern. Der von der drunterliegenden Planungsschicht aufgezeigte Handlungskorridor wird beim interagieren mit den Erwartungsstrukturen gekoppelt.

Kennzeichnend für diese Formen der sozialen Koordinierung ist, dass sie sich auf zukünftige Handlungen der anderen Agenten beziehen. Wie bereits erwähnt ist der Planungsaufwand umso größer, je unsicherer die Umgebung des Agenten ist. Es liegt daher im Interesse des Agenten, die durch Absprachen die Umgebung erwartbarer zu machen, um so die Planungskomplexität zu reduzieren. Erst durch den Aufbau sozialer Erwartungsstrukturen ist für einen beschränktrationalen Akteur eine langfristige Planung möglich.

Die Aufgabe dieser Schicht besteht darin, die Dynamik der sozialen Umwelt relativ zum Handlungskorridor zu stabilisieren und damit prognostizierbar zu machen. Der Agent antizipiert die Interaktionen mit den anderen sozialen Akteuren, indem er seine Handlungen den anderen anpasst und gleichzeitig versucht, diese auf seine Aktivitäten festzulegen. Der von der Planung generierte Handlungskorridor sollte daher idealerweise so beschaffen sein, dass er Raum für Koordinierungs- und Verhandlungsaktivitäten, die nicht direkt der Zielverfolgung selbst zuzurechnen sind, lässt, aber dennoch für den reibungsfreien Ablauf in einer Umwelt mit sozialen Anhängigkeiten sorgt.

Da die sozialen Erwartungstrukturen durch Interdependenzbewätigung Einfluß auf die Generierung des Handlungskorridor der untergeordneten Ebene nimmt, ist es für sozial integrierte, d.h. angepasste Agenten zu erwarten, dass von vorherein nur solche Handlungspläne generiert werden, die an das soziale Feld angepasst sind.

8.5.2 Sozialtheoretische Implikation

Die mehrschichtige Architektur des SONAR-Agenten besitzt den konzeptionellen Vorteil, dass sie erklärt, warum und wie soziale Akteure ihr soziales Umfeld sta-

[13] Der Habitus passt zum Feld.

bilisieren: Akteure handeln mit den Verhaltensregelmäßigkeiten und den Strategien, die durch das soziale Feld erst erzeugt wurden. Indem sie so handeln, bekräftigen sie zudem noch diese Strukturen, tragen also zu ihrem Erhalt bei. Dies erklärt, warum soziale Strukturen kontingente Konstrukte sind, denn ihre Art und Weise ist nur relativ zu den an sie angepassten Strategien und Verhaltensregelmäßigkeiten so und nicht anders notwendig. Die Architektur setzt somit eine aus den ASKO-Studien bekannte Gedankenfigur um, nämlich dass die Akteure danach trachten, die Umgebung so zu gestalten, dass sie besonders gut an sie angepasst sind, d.h. die sie hervorbringenden Elemente werden reproduziert.

Durch die Rückkoppplung begünstigen die Sozialstrukturen solche angepassten Strategien – und damit indirekt auch solche Verhaltensregelmäßigkeiten, die an sie angepasst sind. Wie bereits ausgeführt sind gerade die Anpassungsprozesse des Inkorporierens und der Interdependenzbewältigung jene, die besonders aufwendig sind. Diese Aufwand stellt den Investitionswert in die bestehende Ordnung dar. Es ist natürlich, dass das Handeln der Akteure danach trachtet, diesen Investitionswert zu erhalten. Dies ist kein bewusst angestrebtes Ziel, sondern vielmehr eine beiläufige Konsequenz für die Agenten, die in den Sozialstrukturen (aber nicht unbedingt mit ihnen) handeln.

Wir erkennen aber, dass jede beliebige Struktur – unabhängig von Effizienzgesichtspunkten – den an sie angepassten Akteuren Vorteile bietet, da sie die Welt ordnet und die Akteure der gegenseitigen Verbundenheit versichert. Es ist nicht notwendig, dass die Struktur objektiv rationalen Optimierungskritererien entspricht. Die Strukturen sind optimal für das Symbolsystem eines sozialen Feldes, jedoch ist das Symbolsystem – anders als ein Ökosystem – nicht an objektive Umweltbedingung angepasst, sondern seinerseits auch sozial konstruiert.

Das Design des Handlungsfindungsprozess im Rahmen einer mehrstufigen, wechseitig gekoppelten Architektur bietet den an die Struktur angepassten Akteuren Vorteile bei der Koordinierung. Explizit dargestellte Normen soziorationaler Planung stoßen schon bei kleinen Gruppen an ihre Grenzen. So ist es zwar für kleine Arbeitsgruppen – beispielsweise Projektteams – möglich, ein gemeinsames Normensystem kooperativ auszuhandeln und zu etablieren; auf der Ebene von Großgruppen – beispielsweise von Gesellschaften – sind diese Mechanismen jedoch nicht praktikabel, so dass hier die indirekte Kommunikation über Symbole stattfindet, deren Wirksamkeit sich erst durch die allgemeine Anerkennung ergibt. Hier zeigt sich deutlich, dass die Sozionik und hier speziell die Gesellschaftstheorie einen Beitrag leistet, der über die bestehenden Konzepte hinaus geht.

Der Planungsprozess des SONAR-Agenten zeichnet sich dadurch aus, dass die unterste Schicht den Planungskorridor durch Wahl der Handlungsmöglichkeiten und die oberste durch die Sozialstrukturen eingrenzt. Ein an das soziale Umfeld angepasster Agent besitzt genau solche Handlungsmöglichkeiten und Strategien, die für seine Ziele praktisch sind und blendet alle anderen bereits frühzeitig aus, denn die Sozialstrukturen begünstigen solche Strategien, die an sie angepasst sind. Der Trennung des Planungsprozess in drei Ebenen erlaubt es somit einem an das soziale Umfeld angepassten Agenten, Pläne ressourcensparend zu generieren. Ein Planungsprozess, der diese Trennung nicht aufweist, müsste aus-

gehend von allen atomaren Handlungen Pläne generieren und gleichzeitig dafür sorgen, dass diese sozial integrierbar sind.

Der Vorteil verkehrt sich natürlich in einen Nachteil, sobald sich die sozialen Rahmenbedingungen (z.B. die Erwartungsstrukturen) schlagartig ändern, beispielsweise weil der Agent seinen sozialen Kontext ändert, indem er von einer Plattform zur nächsten migriert. Ein rational planender Agent weiß, dass er zunächst ein Defizit an Wissen über seine Handlungspartner besitzt, was er durch Beobachtung ausgeleichen muss. Ein internalisierender Agent nach dem hier vorgestellten Architekturmodell muss sich jedoch erstmal von den gewissermaßen „liebgewonnen“ Handlungsstrukturen trennen. Da er jedoch viel in diese Strukturen investiert hat und diese sich auch unter alten Umständen bewährt haben, werden die Handlungen auch im neuen Umfeld im Kern noch auf den alten Handlungsregeln operieren. Diese führt in dem neuen Umfeld aber meist zu suboptimalen Handlungen, im Extremfall ist sogar jedwede Zielverfolgung unmöglich. Daher müssen im Laufe der Zeit Reflektions- und neue Internalisierungsprozesse stattfinden, um besser an die Strukturen angepasst zu sein. Unter Umständen ist es jedoch sogar sinnvoller, mit einer suboptimalen Lösung zu arbeiten als zu internalisieren, da die Kosten der Internalisierung die Verluste einer suboptimalen Lösung überwiegen können.

8.5.3 Sonar-Agenten und die Mikro/Makro-Dualität

Betrachten wir noch einmal den dualen Aufbau der Agentenklassen bzw. die Symmetrie von Mikro- und Makroelemente, die sich auch in dem Verhältnis der Sonar-Agenten widerspiegelt: Die internen Abläufe jener Agenten, die individualistische Mikroelemente repräsentieren, sind spiegelsymmetrisch zu jenenen Agenten, die überindividuelle Makroelemente repräsentieren.

Vergleiche dazu Abbildung 8.16: Einzelne Mikro-Agenten internalisieren Routinen, sie planen im sozialen Kontext, mit dem sie interferieren, und sie interagieren sozial innerhalb von Konstellationen, zumeist um soziale Interdependenzen aufzulösen. Auf der überindividuellen Ebene kommt es im sozialen Feld durch Koordinierung zur Bildung vorstrukturierter Konstellationen, die durch Festigung zur sozialen Institution werden können.

Man stellt fest, dass die überindividuellen Tätigkeiten (Koordinieren und Institutionalisieren) die spiegelbildlichen Aktivitäten der individuellen (internalisieren und Planen) sind. In der Terminologie Norbert Elias' korrespondiert das Internalisieren in symmetrischer Weise mit dem Offizialisieren bzw. der Institutionalisierung. Analog findet sich dies bei Pierre Bourdieu als Symmetrie von Habitus und Kapitalkursen im Feld. Bei Heinrich Popitz korrespondieren der soziale Investitionswert der Akteure mit den normativen Erwartungstrukturen. Die Begriffspaare werden in sozialen Prozessen integriert: Bei Elias ist es die von Ängsten und Schamgefühlen angetriebene Normreproduktion, bei Bourdieu ist es der Symbolkampf im Feld, bei dem die Akteure danach trachten ihr symbolisches Kapital zu vergrößern und bei Popitz ist es der Wunsch der Akteure, die Außenwelt zu ordnen und damit prognostizierbar und beherrschbar zu gestalten, der zur Ausbildung und Reproduktion von Verhaltensregelmäßigkeiten führt.

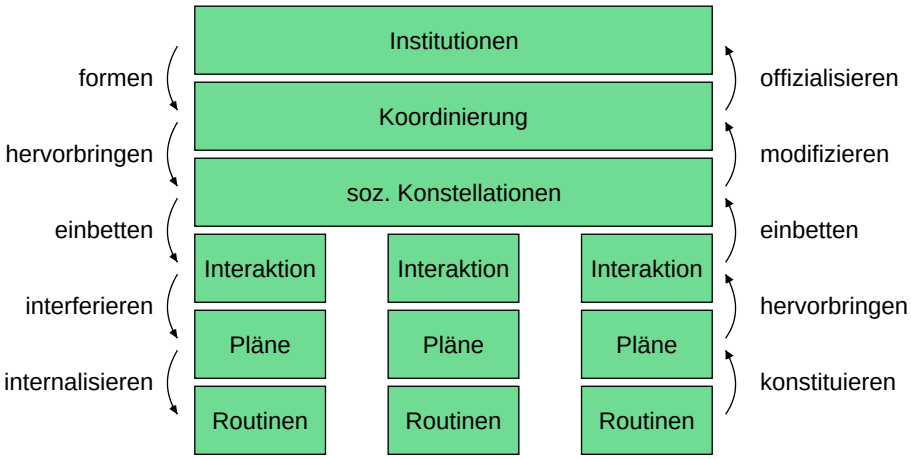


Abbildung 8.16: Institutionalisierung von Koordination

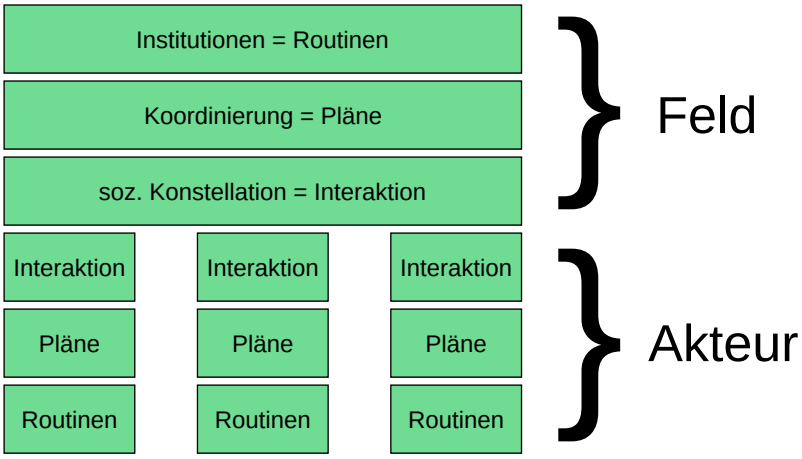


Abbildung 8.17: Strukturähnlichkeit

Berücksichtigt man diese Symmetrie der Abbildung 8.16, so stellt man fest, dass die überindividuellen Tätigkeiten des Feldes eine Entität darstellen, die gewissermaßen einen „auf dem Kopf stehenden“ Akteur entsprechen (vgl. dazu die Abbildung 8.17). Dies illustriert unmittelbar die Symmetrie und auch die Rekursivität des hier verfolgten Ansatzes, die sich in der SONAR-Architektur als elementares Designkonzept wiederfinden wird.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir ein Rahmenmodell reflexiv selbstorganisierender Systeme entwickelt. Hierbei war die Theoriesymmetrie die wir in all unseren Modellen vorgefunden haben der Ausgangspunkt. Die Theoriesymmetrie äußert sich als Prädisposition von Mikro- und Makroelementen. Diese Selbstähnlichkeit innerhalb des Modells bildet die Grundlage der sozialen Reproduktion.

Wir haben die Struktur, die in selbstähnlicher Form auftaucht, in diesem Abschnitt als Handlungsregelwerk bezeichnet. Soziale Systeme sind Interaktionsformen von Handlungsregelwerken, die wir als Entitätensysteme bezeichnen. Handlungsregelwerke sind das formale Pendant zur TSSO, denn auch hier betrachten wir praktisches Anerkennen, Vermögensstrukturen und reflexive Symbolik. Die Bezüge zu den Modellen der TSSO ließen sich ohne Mühe direkt auf Modellebene rekonstruieren.

Auf Basis der Entitätensysteme haben wir dann das Modell des SONAR-Agenten mitsamt seiner spezifischen Aspekte – der Verhaltensregelmäßigkeiten, der Planung und der sozialen Interaktion – entwickelt.

An dieser Stelle wird besonders deutlich, dass es nicht der Akteur und auch nicht die Struktur ist, die primär im Vordergrund stehen. Es ist vielmehr der Charakter der Prozesse, der in beiden Elementen vorkommt, zu betonen. Diese Prozesse interagieren reflexiv miteinander und reproduzieren sich und erzeugen auch neue Interaktionsformen (vgl. dazu die Konstitutionsdynamik aus Kapitel 7).

Die Mikro/Makro-Dualität zeigt sich in diesem Modell anhand der Tatsache, dass die Agenten nicht primär als Handelnde, sondern als Träger von Verhaltensregelmäßigkeiten gesehen werden. Dies hat eine generalisierte Architektur zur Folge, bei der man sogar eine Autopoiese von Koordination konzeptionalisert. Die Agenten sind Träger dieser Interaktionsformen, wobei je nach Beobachter ein Agent als Akteur, als Organisationsstruktur usw. erscheint.

Teil IV

SONAR: Eine sozialtheoretisch fundierte Architektur für Multiagentensysteme

„Unsere Idee ist, dass wir Informatiker nur wenige [..] Elemente nutzen – in der Hoffnung, dass wir verstanden werden. [..] Petrinetze: Das ist einer der wenigen Ansätze, die sich seit den sechziger Jahren gehalten haben – weil das ein ganz simples Modell ist, mit dem sich nahezu alles beschreiben lässt.“

Prof. Heinrich Mayr,
Computer Zeitung,
Nummer 6, Februar 2007.

Überblick

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse der Theorieanalyse und -modellierung aus dem zweiten Teil dieser Arbeit sowie die Theorieintegration aus dem dritten Teil auf die Konzeption von Multiagentensystemen bezogen. Es ergibt sich ein Organisationsmodell, dessen Grundkonzepte – Interaktionsprozesse, Teams und Organisationsstruktur – wie in Abbildung 8.18 ineinandergreifen.

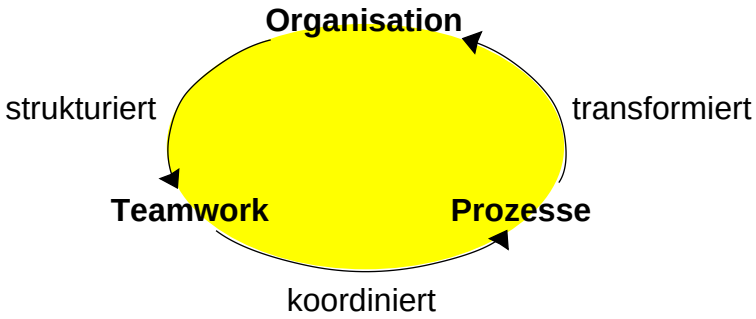


Abbildung 8.18: Abhängigkeiten der SONAR-Konzepte

In Kapitel 9 formalisieren wir die Interaktion verteilter Systeme durch den Formalismus der Dienstnetze. Dienstnetze sind gefärbte Petrinetze, die mit einer Konzeptbeschreibung und einer Rollenstruktur versehen sind. Die Rollenstruktur erlaubt es, spezifische Anteile von Dienstnetzen zu betrachten: die Rollenkomponenten. Dies sind Netzkomponenten, die die Eigenschaft besitzen, dass sie in hohem Maße miteinander kompatibel sind.

In Kapitel 10 wird ein petrinetzbasiertes Modell eines *Teams* entwickelt, das für sozial interagierende Akteure einen sozialen Kontext darstellt. Wir definieren das Modell der Delegationsnetze, das sowohl einen statischen als auch einen dynamischen Wohlgeformtheitsbegriff beinhaltet. Teams besitzen die Eigenschaft, dass sie die Koordination der Teamagenten innerhalb eines gemeinsamen Teamdienstes realisieren. Dieses Teammodell bildet die Grundlage für die im Team agierenden SONAR-Agenten. Wir gelangen zu einer klaren Beschreibung, wie

SONAR-Agenten ein Team formieren und wie sie im Team einen Teamplan generieren.

In Kapitel 11 entwickeln wir ein formales Modell der Multiagentensysteme, dass sowohl der Mikroperpektive als auch der Makroperspektive gerecht wird. Hier wird ein spezielles Modell sozialer Strukturen untersucht, in die Akteure eingebettet werden: *Organisationen*. Organisationen werden formal als Netzwerk von Positionen modelliert. Das formale Modell wird hier besonders in Hinblick auf Wohlgeformtheitskriterien studiert. Dieser Abschnitt schließt an den vorangegangenen insofern an, als dass wir von der Organisation Teamstrukturen ableiten – Organisationsteams genannt – die stets besonders wohlgeformt sind. Zudem leiten wir von der Organisation eine agentenbasierte Ausführungsumgebung – den Positionsagenten – auf Basis des SONAR-Agenten aus.

Als nächsten Schritt betrachten wir in Kapitel 12 *Transformationen* von Organisationen, d.h. Operationen, die Organisationsinstanzen auf solche abbilden. Diese Transformationen bilden die formale Grundlage zur Beschreibung der Elementaroperationen eines Organisationsprozesses. Wird der Organisationsprozess von den Organisationsmitglieder selbst erzeugt, so sprechen wir von *Selbstorganisation*. In diesem Abschnitt werden die Strukturen untersucht, die die Anwendung der Transformationsoperationen regeln. Wir betrachten also das den Selbstorganisationsprozessen zugrundeliegende Regelwerk.

Kapitel 13 zeigt eine verfeinerte Sicht auf die Organisation. Haben wir bislang nur die formale Organisation behandelt, so betrachten wir nun die informelle Organisation, indem wir auch noch die Akteure, d.h. die *Organisationsmitglieder* selbst, hinzunehmen. In diesem Abschnitt behandeln wir die Teamformation die Teamplanung und die Teamkontrolle als Teamwork-Prozesse, die auf der Interaktion von Positions- und Mitgliederagenten basiert.

9 Interaktion verteilter Systeme

Im folgenden wollen wir verteilte Rollen-Interaktionen beschreiben, d.h. Abläufe, bei denen die Handlungen von Akteuren ausgeführt werden, die eine Rolle wahrnehmen. Solche Interaktionen lassen sich durch Interaktionsdiagramme beschreiben, bei denen jeder Rolle eine Lebenslinie zugeordnet ist.

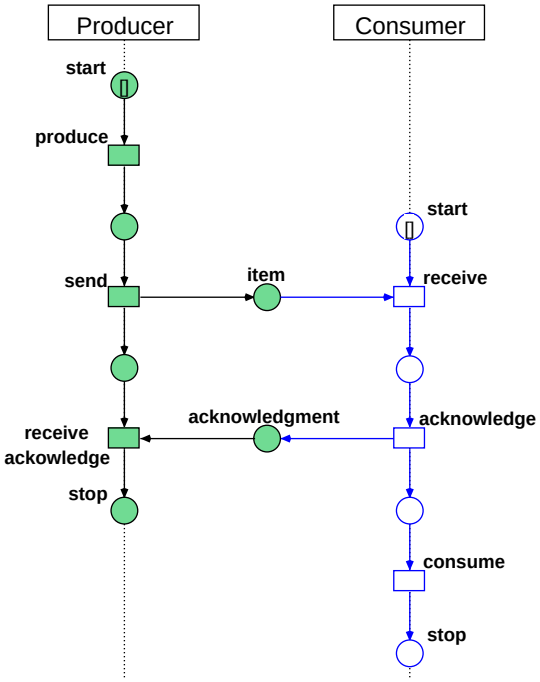


Abbildung 9.1: PC_1: Das Dienstnetz: Producer/Consumer

Um das Verhalten solcher Diagramme formal beschreiben zu können, entwickeln wir in diesem Kapitel den Formalismus der *Dienstnetze*.[1] In der Literatur existieren zahlreiche petrinetzbasierte Ansätze, die sich mit der Interaktionsperspektive in Multiagentensystemen auseinandersetzen (siehe dazu Holvoet, 1995; Chainbi u. a., 1996; Moldt und Wienberg, 1997; Billington u. a., 1998; Gois u. a., 1998; Fiorino und Tessier, 1998; Cost u. a., 1999; Hameurlain u. a., 1999; Köhler u. a., 2001; Cabac u. a., 2003). Abbildung 9.1 zeigt das dem Interaktionsdiagramm für das *Producer/Consumer* Szenario zugrundeliegende Dienstnetz. Es sind die beiden Rollen *Producer* und *Consumer* beteiligt.

Jeder Rolle des Dienstnetzes wird eine Komponente zugeordnet. In dem Beispiel stellen die ausgefüllten Netzelemente die Producer-Komponente dar. Im

[1] Dieser Abschnitt erweitert die Vorarbeiten in (Köhler und Ortmann, 2005; Köhler u. a., 2006).

praktischen Kontext besitzen Dienstnetze die Eigenschaften, dass jeder Rolle R eine Interaktionslinie zugeordnet sind, so dass die R-Komponente aus einer Lebenslinie (evtl. mit AND- oder OR-Verzweigungen) besteht, deren Randstellen gerade die Nachrichten sind. In (Cabac u. a., 2003) bilden solche R-Komponenten die Grundlage zur Generierung von Protokollen aus Dienstnetzen.

9.1 Modellierung von Interaktionen durch Dienstnetze

Im folgenden wollen wir Netze mit gefärbten Marken betrachten. Es existieren drei prominente Formalismen gefärbter Netze: die *Prädikaten/Transitionsnetze* nach Genrich und Lautenbach (1981), die *algebraischen Netze* nach Reisig (1991) und die *Coulored Petri Nets* nach Jensen (1992). (Für eine Einführung siehe Jensen und Rozenberg, 1991).Wir formalisieren Dienstnetze im folgenden als algebraische Netze, bei denen die Marken Elemente eines algebraischen Datentyps sinds. Wir nehmen dabei die Signatur nicht als direkt gegeben an, sondern generieren sie anhand einer Konzeptbeschreibung.

9.1.1 Ablaufnetze

Wir betrachten im folgenden ungewichtete Netze $N = (P, T, F)$, die keine isolierten Transitionen besitzen, d.h. $\forall t \in T : {}^\bullet t \neq \emptyset \wedge t^\bullet \neq \emptyset$. Solche Netze heißen *$T$-schlicht*.

Wir fordern, dass jeder Netzknoten auf einem Pfad zwischen den Randknoten des Netzes liegt.[2] Mit der Notation ${}^\circ N = \{n \in (P \cup T) \mid {}^\bullet n = \emptyset\}$ und $N^\circ = \{n \in (P \cup T) \mid n^\bullet = \emptyset\}$ für die Randknoten heißt dies:

$$\forall n \in (P \cup T) : \exists i \in {}^\circ N, o \in N^\circ : iF^*nF^*o \tag{9.1}$$

Man beachte, dass für T-schlichte Netze ${}^\circ N, N^\circ \subseteq P$ gelten muss.

Definition 9.1 *Ein* Ablaufnetz *ist ein T-schlichtes Petrinetz $N = (P, T, F)$, bei dem jeder Knoten $n \in P \cup T$ auf einem Pfad zwischen einem ${}^\circ N$ und N° liegt.*

Die Markierung m_i, in der alle Stellen aus ${}^\circ N$ einfach markiert sind, heißt kanonische Initialmarkierung, die Markierung m_f, in der nur die Stellen aus N° markiert sind, heißt kanonische Finalmarkierung:

$$m_i(p) = \begin{cases} 1, & \textit{falls } p \in {}^\circ N \\ 0, & \textit{sonst} \end{cases} \quad \textit{und} \quad m_f(p) = \begin{cases} 1, & \textit{falls } p \in N^\circ \\ 0, & \textit{sonst} \end{cases}$$

9.1.2 Konzept-Spezifikation

Algebraische Netze nutzen *abstrakte Datentypen* zur Spezifikation der Marken. Die Spezifikation eines abstrakten Datentyps besteht aus einer formalen Sprache, der Signatur, die durch eine Algebra interpretiert wird (vgl. dazu Ehrig

[2] Würden wir nur fordern, dass alle Knoten zwischen ${}^\circ N$ und N°, sondern zwischen Teilmengen $P_i \subset {}^\circ N$ und $P_f \subset {}^\circ N$ liegen, dann kann eine Stelle $p \in {}^\circ N \setminus P_i$ nicht zwischen P_i und P_f liegen, da ${}^\bullet p = \emptyset$ gilt. Analog liegt keine Stelle $p \in N^\circ \setminus P_f$ zwischen P_i und P_f, da $p^\bullet = \emptyset$ gilt. Also müssen wir stets den kompletten Rand betrachten.

und Mahr, 1985; Loeckx u. a., 1996). Wir betrachte im folgenden mehrsortige Signaturen.

Eine (heterogene) *Signatur* $\Sigma = (K, \Omega)$ besteht aus einer endlichen Menge an *Sorten* (engl. „kinds“) K, einer endlichen indizierten Menge $\Omega = \{\Omega_{w,k}\}_{w \in K^*, k \in K}$ von *Operatoren*. In Anlehnung an die Notation für Funktionen werden Operatoren kurz als $\omega : k_1 \times \ldots \times k_n \to k$ für $\omega \in \Omega_{k_1 \ldots k_n, k}$ notiert. Operatoren $\omega \in \Omega_{\lambda,k}$ bezeichnen Konstanten der Sorte k.

Eine Erweiterung der mehrsortigen Signaturen stellt die *Membership Equational Logic* (MEL) (Meseguer, 1997; Bouhoula u. a., 2000) dar. Membership Equational Logic stellt eine konservative Erweiterung der *many-sorted algebra* sowie der *order-sorted algebra* dar. Zusätzlich zu den Sorten $k \in K$ werden Teilsorten $s \in S_k$ definiert, wobei mehrere Teilsorten einer Sorte zugeordnet werden. Werden keine Teilsorten definiert, so entspricht die Membership Equational Logic einer mehrsortigen Signatur. In jeder Algebra einer Membership Equational Logic sind die Träger der Teilsorten durch Teilmengen der Trägermenge der Hauptsorte definiert. Elemente der Teilsorten korrespondieren intuitiv zu den wohlgeformten Objekten der allgemeinen Hauptsorte. Eine Membership Equational Logic erlaubt es, Aussagen über das Enthaltensein eines Terms in einer Teilsorte zu treffen.

Definition 9.2 *Eine MEL-Signatur $\Sigma = (K, \Omega, S)$ besteht aus einer endlichen Menge an Sorten K, so dass (K, Ω) eine Signatur ist, und einer K-indizierten Menge $S = (S_k \mid k \in K)$ an paarweise disjunkten* Teilsorten*, wobei $S_k \cap K = \emptyset$ angenommen wird.*

Sei eine Signatur $\Sigma = (K, \Omega)$ und eine indizierte Variablenmenge $X = (X_k \mid k \in K)$ mit disjunkten Variablenmengen X_k gegeben.

Definition 9.3 *Die Menge der* Terme $\mathbb{T}^k_\Sigma(X)$ *der Sorte k über den Variablen X ist induktiv definiert:*

1. *Für alle Variablen $x_k \in X_k$ gilt $x_k \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$.*
2. *Für alle Konstanten $\omega : \lambda \to k$ gilt $\omega \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$.*
3. *Sei $\omega : k_1 \cdots k_n \to k$ und $t_i \in \mathbb{T}^{k_i}_\Sigma(X)$ für alle $1 \leq i \leq n$, dann gilt $\omega(t_1, \ldots, t_n) \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$.*

Dann bezeichnet $\mathbb{T}_\Sigma(X) := \bigcup_{k \in K} \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$ die Menge aller Terme mit den Variablen X. Die Menge $\mathbb{T}_\Sigma := \bigcup_{k \in K} \mathbb{T}^k_\Sigma$ mit $\mathbb{T}^k_\Sigma := \mathbb{T}^k_\Sigma(\emptyset)$ enthält alle Grundterme.

Sei $t \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$ ein Term. Die Menge der verwendeten Variablen $\textsc{Var}(t)$ von t ergibt sich mit der induktiven Termstruktur und den Definitionen $\textsc{Var}(x) := \{x\}$ für $x \in X_k$ und $\textsc{Var}(\omega(t_1, \ldots, t_n)) := \bigcup_{i=1}^n \textsc{Var}(t_i)$.

Seien $t, w \in \mathbb{T}_\Sigma(X)$ Terme, dann wird durch $t[w/x]$ die Substitution im Term t von der Variable x durch den Term w bezeichnet. Die simultane Substitution wird mit $t[w_1, \ldots, w_n/x_1, \ldots, x_n]$ bezeichnet.

Die atomaren Formeln, die mit den Termen der Signatur gebildet werden, sind entweder Aussagen über das Enthaltensein eines Terms in einer Teilsorte (engl. „membership“) oder die Gleichheit zweier Terme.

Definition 9.4 *Jede* MEL-Formel ϕ *ist von der Form:*

1. $t \in s$ *für* $s \in S_k$ *und* $t \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$.
2. $t_1 = t_2$ *für* $t_1, t_2 \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$.
3. $(\phi_1 \wedge \ldots \wedge \phi_n)$ *für Formeln* ϕ_i.

Ein MEL-Axiom *hat die Form (für eine MEL-Formel* ϕ*):*

1. $\forall X : \phi \Longrightarrow (t \in s)$.
2. $\forall X : \phi \Longrightarrow (t_1 = t_2)$.

Eine Datentyp-Spezifikation $\mathcal{S} = (\Sigma, X, E)$ *besteht aus einer Signatur* $\Sigma = (K, \Omega, S)$*, einer disjunkten Familie von Variablen* $X = (X_k \mid k \in K)$ *und einer Familie* $E = (E_k \mid k \in K)$ *von Axiomen.*
Die Menge aller MEL-Formeln wird mit $MEL_\mathcal{S}$ *bezeichnet.*

Auch wenn die Definition für die Axiome $\forall X : \phi \Longrightarrow \psi$ nur die Konjunktion für ϕ erlaubt, kann die Disjunktion $\forall X : (\phi_1 \vee \phi_2) \Longrightarrow \psi$ doch mit der logischen Äquivalenz $(A \vee B) \Longrightarrow C \equiv (A \Longrightarrow C) \wedge (B \Longrightarrow C)$ durch zwei Axiome formuliert werden.

Man beachte, dass nur Terme der Sorten $k \in K$, nicht aber der Teilsorten s definiert sind. Mit den Teilsortenformeln können wir aber eine praktische Kurznotation vereinbaren: Im folgenden verwenden wir die Notation $t \in \mathbb{T}^s_\Sigma(X)$ für eien Teilsorte $s \in S_k$, wenn $t \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$ und $t \in s$ gilt.

Wenn eine Datentyp-Spezifikation keine Teilsorten definiert, so entspricht die Spezifikation in Membership Equational Logic einer mehrsortigen Signatur. Das klassische Beispiel einer solchen Sigantur ist die Sorte NAT der natürlichen Zahlen, die durch die Operatoren $0 \in \Omega_{\lambda,\mathrm{NAT}}$ und $suc \in \Omega_{\mathrm{NAT},\mathrm{NAT}}$ beschrieben wird. Daraus leitet sich die Addition als Gleichungsspezifikation ab. In der MAUDE-Syntax (Maude, 1999) wird dies folgendermaßen notiert:

```
fmod NAT is
  sort Nat .
  op 0 : -> Nat .
  op suc : Nat -> Nat .
  op _+_: Nat Nat -> Nat .

  vars M N : Nat .
  eq 0 + N = N .
  eq suc(M) + N = suc(M + N) .
endfm
```

In diesem Beispiel können die Gleichungen als Ersetzungsregeln von links nach rechts angewendet werden. Da Termination und Konfluenz gilt, erzeugt diese Reduktion eine Normalform der Gestalt $suc^n(0)$.

Eine Algebra zu einer Signatur besteht aus einer indizierten Familie von Trägermengen zusammen mit einer Familie von Funktionen.

Definition 9.5 *Eine* Σ-Algebra $A = (\llbracket K \rrbracket_A, \llbracket \Omega \rrbracket_A, \llbracket S \rrbracket_A)$ *zu der Signatur* $\Sigma = (K, \Omega, S)$ *besteht aus*

- *einer indizierten Familie disjunkter Trägermengen* $\llbracket K \rrbracket_A = (\llbracket k \rrbracket_A \mid k \in K)$,
- *einer indizierten Familie von Funktionen*

$$\llbracket \Omega \rrbracket_A = \left(\llbracket \omega \rrbracket_A : \llbracket k_1 \rrbracket_A \times \cdots \times \llbracket k_n \rrbracket_A \to \llbracket k \rrbracket_A \mid \omega \in \Omega_{k_1 \cdots k_n, k}\right)$$

- *einer indizierten Familie disjunkter Submengen* $\llbracket S \rrbracket_A = (\llbracket S_k \rrbracket_A \mid k \in K)$, *so dass für alle* $\llbracket s \rrbracket_A \in \llbracket S_k \rrbracket_A$ *auch* $\llbracket s \rrbracket_A \subseteq \llbracket k \rrbracket_A$ *gilt.*

Sei eine Spezifikation $\mathcal{S} = (\Sigma, X, E)$ gegeben. Eine *Variablenbelegung* $\alpha : X \to \llbracket K \rrbracket_A$ ist eine Familie $(\alpha_k \mid k \in K)$ von Abbildungen $\alpha_k : X_k \to \llbracket k \rrbracket_A$. Jede Variablenbelegung α induziert die Auswertungsabbildung $\overline{\alpha} : \mathbb{T}_\Sigma(X) \to \llbracket K \rrbracket_A$ auf Termen. Die *Auswertung* $\overline{\alpha}(t)$ eines Terms $t \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$ in der Algebra A ist induktiv definiert:

1. $\overline{\alpha}(x_k) = \alpha(x_k)$ für $x_k \in X_k$.
2. $\overline{\alpha}(\sigma(t_1, \ldots, t_n)) = \llbracket \sigma \rrbracket_A(\overline{\alpha}(t_1), \ldots, \overline{\alpha}(t_n))$ für $\sigma(t_1, \ldots, t_n) \in \mathbb{T}^k_\Sigma(X)$.

Definition 9.6 *Die Gültigkeit einer MEL-Formel* ϕ *unter einer Belegung* α *ist definiert durch:*

1. $A, \alpha \models (t \in s)$, *gdw.* $\alpha(t) \in \llbracket s \rrbracket_A$.
2. $A, \alpha \models (t_1 = t_2)$, *gdw.* $\alpha(t_1) = \alpha(t_2)$.
3. $A, \alpha \models (\phi_1 \wedge \ldots \wedge \phi_n)$, *gdw.* $A, \alpha \models \phi_i$ *für alle* $1 \leq i \leq n$.

Ein Axiom $\forall X : \phi \Longrightarrow \phi'$ *ist in der Algebra* A *gültig (notiert als* $A \models \forall X : \phi \Longrightarrow \phi'$*), gdw.* ϕ' *in allen Belegungen* α *gültig ist, für die auch* ϕ *gültig ist.*

Eine Σ*-Algebra* A*, für die alle Axiome der Spezifikation* $\mathcal{S} = (\Sigma, X, E)$ *gültig sind, heißt* $\mathcal{S}$-Theorie.

Eine Signatur Σ generiert die Kategorie Σ-*Alg*, die als Objekte Σ-Algebren und als Morphismen Σ-Algebra-Morphismen besitzt. Die allgemeinste Algebra ist in die *Termalgebra* $T(\Sigma)$, die jeden Operator ω in Σ durch sich selbst interpretiert, d.h. für alle $t_i \in \mathbb{T}^{k_i}_\Sigma$, $1 \leq i \leq n$ gilt:

$$\llbracket \omega \rrbracket_{T(\Sigma)}(t_1, \ldots, t_n) = \omega(t_1, \ldots, t_n)$$

Die Termalgebra ist das initiale Objekt der Kategorie Σ-*Alg*, d.h zu jeder Σ-Algebra A existiert ein eindeutig bestimmter Homomorphismus $h_A : T(\Sigma) \to A$. Die Termalgebra ist zudem noch minimal und enthält keine trivialen Gleichungen.

Analog generiert jede Spezifikation $\mathcal{S} = (\Sigma, X, E)$ die Kategorie $\mathcal{S}$-*Alg* aller $\mathcal{S}$-Algebren. Die Kategorie aller $\mathcal{S}$-Algebren besitzt ebenfalls ein initiales Objekt, nämlich die Kongruenzalgebra.Die *Kongruenzalgebra* $\mathbb{T}_{\Sigma,E} := \mathbb{T}_\Sigma / \equiv_E$ der Termalgebra $\mathbb{T}_\Sigma$ ist das initiale Objekt der Kategorie $\mathcal{S}$-*Alg*. Die Mengen $\mathbb{T}_{\Sigma,E}$ und $\mathbb{T}_{\Sigma,E}(X)$ bezeichnen die Algebra der Kongruenzklassen-Terme bezüglich der Gleichungsmenge E.

9.1.3 Konzeptbeschreibung

Teilsorten werden eingesetzt, um wertabhängigige Typisierungen aussprechen zu können. Betrachten wir dazu das Beispiel eines Graphen (V, E) mit Knotenmenge V und Kantenmenge E.

Eine Kantenwort ist ein Element $w \in E^*$, also ein Element des freien Monoids $(E^*, \cdot, \epsilon)$. Nun ist aber nicht jedes Kantenwort auch ein Pfad im Graph. Ein Pfad w des Graphen zeichnet sich dadurch aus, dass für jede Zerlegung $w = w_1 \cdot w_2$ gilt, dass der Endknoten von w_1 mit dem Anfangsknoten von w_2 identisch ist. Dies ist aber eine Bedingung, die wir nicht mehr auf der Ebene der Sorte der Worte direkt festmachen können, da die Eigenschaft, ob $w_1 \cdot w_2$ ein Pfad ist, nicht nur von $\cdot$, sondern auch an den Attributen von w_1 und w_2 abhängt. Diese wertabhängige Typisierung der Teilsorte Path lässt sich leicht in Membership Equational Logic formulieren. Sei e eine Kantenvariable und p eine Pfadvariable, dann fomulieren wir das Axiom:

$$\forall e, p : \text{target}(e) = \text{source}(p) \Longrightarrow (e \cdot p) \in \mathsf{Path}$$

Die Sorte `Seq` beschreibt alle potentiellen Pfade, die syntaktisch durch den Operator `;` bildbar sind. Ein echter Pfad des Graphen wird durch die Sorte `Path` beschrieben. Jede Kante ist ein echter Pfad, was durch die Notation `subsorts Edge < Path` ausgedrückt wird. Das obige Axiom lautet in MAUDE-Syntax:

```
cmb (E ; P) : Path if target(E) == source(P) .
```

Hierbei steht *cmb* für *conditonal membership*. Die gesamte Spezifikation ergibt sich wie folgt:

```
sorts Edge Node Path Seq .
subsorts Edge < Path < Seq .

ops source target : Edge -> Node .
op _;_ Seq Seq -> Seq [assoc] .
ops source target : Path -> Node .
op length : Path -> Nat .

var E : Edge .  var P : Path .

cmb (E ; P) : Path if target(E) == source (P) .

eq source(E ; P) = source(E) .
eq target(E ; P) = target(P) .

eq length(E) = suc(0) .
eq length(E ; P) = suc(0) +  length(P) .
```

In diesem Beispiel werden Subsorten verwendet, um – beispielsweise für den Operator `length` – Pfade nicht erst auf der Termebene, sondern schon auf Ebene des Typsystems auszuzeichnen. Beispielsweise erwartet der Operator `length` eine Argument vom Typ `Path`. In der Gleichung `eq length(E ; P) = suc(0) + length(P)` ist `(E ; P)` zunächst vom Typ `Seq`. Es ist also notwendig, zunächst `(E ; P) : Path` herzuleiten, bevor die Gleichung angwendet werden kann.

Die Membership Equational Logic ist reich genug, um bereits Typkonstruktionen wie Schnitt oder Vereinigung darzustellen. Wir vergleichen im folgenden das Verhältnis der memberships zu der Subsumptionsbeziehung der Beschreibungslogik.

9.1.4 Beschreibungslogik

Beschreibungslogik bildet Formeln über elementaren Konzepten und Relationen zwischen ihnen (die als *Rollen* bezeichnet werden – nicht zu Verwechseln mit den Rollen der nachfolgenden Dienstnetze), die durch Operationen verknüpft werden können. Die Subsumption $\sqsubseteq$ ist das alleinige Prädikat der Logik.

Betrachten wir ein Beispiel: Seien Woman und Man atomare Konzepte und hasChild die Eltern/Kind-Relation. Eine mögliche darauf aufbauende Terminologie (die T-Box) beschreibt abgeleitete Konzepte und Relationen:

$$\begin{aligned} \mathsf{Person} &\equiv \mathsf{Woman} \sqcup \mathsf{Man} \\ \mathsf{Mother} &\equiv \mathsf{Woman} \sqcap \exists \mathsf{hasChild}.\mathsf{Person} \\ \mathsf{Father} &\equiv \mathsf{Man} \sqcap \exists \mathsf{hasChild}.\mathsf{Person} \\ \mathsf{Parent} &\equiv \mathsf{Mother} \sqcup \mathsf{Father} \\ \mathsf{Grandmother} &\equiv \mathsf{Woman} \sqcap \exists \mathsf{hasChild}.\mathsf{Parent} \end{aligned}$$

Zyklischen Definitionen sind hierbei nicht erlaubt. Die *Subsumption* bezeichnet das Enthaltensein eines Konzeptes in einem anderen. Für unser Beispiel gilt unter anderem, dass jede Mutter eine Frau ist und jede Frau eine Person:

$$\mathsf{Mother} \sqsubseteq \mathsf{Woman} \sqsubseteq \mathsf{Person}$$

Daneben speichert eine Wissensdatenbank (die A-Box) Fakten ab:

$$\begin{aligned} &\mathsf{Woman}(eva) \\ &\mathsf{Man}(adam) \\ &\mathsf{hasChild}(eva, abel), \mathsf{hasChild}(eva, kain) \end{aligned}$$

Definition 9.7 *Seien N_C und N_R paarweise disjunkte, abzählbar unendliche Mengen von* Konzept-*, respektive* Rollennamen*. Dann ist die* Konzeptbeschreibungen *der Beschreibungslogik $\mathcal{ALC}$ folgendermaßen definiert:*

1. *Jeder atomare Ausdruck A ist eine $\mathcal{ALC}$-Konzeptbeschreibung.*
2. *$\top$ und $\bot$ sind $\mathcal{ALC}$-Konzeptbeschreibungen.*
3. *Sind C und D jeweils $\mathcal{ALC}$-Konzeptbeschreibungen und R eine Rolle, so sind auch $\neg C$, $(C \sqcup D)$, $(C \sqcap D)$, $\exists R.C$ und $\forall R.C$ auch $\mathcal{ALC}$-Konzeptbeschreibungen.*

Man erkennt, dass die Konzepte unäre und die Rollen binäre Relationen sind, die in der Beschreibungslogik allerdings in einer variablenfreien Notation verwendet werden:

$$C \sqcap D \text{ steht für } \forall x : C(x) \wedge D(x)$$

Daher werden Konzepte durch Teilmengen eines Universums und Rollen als binäre Relationen definiert.

Definition 9.8 *Eine* Interpretation $(\Delta, \cdot^{\mathcal{I}})$ *besteht aus einer nicht-leeren Grundmenge* Δ *und einer Interpretationsfunktion* $\cdot^{\mathcal{I}}$*:*

- *Jedem Konzeptbezeichner* $A \in N_C$ *wird eine Menge* $A^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta$ *zugewiesen.*
- *Jedem Rollenbezeichner* $R \in N_R$ *wird eine binäre Relation* $R^{\mathcal{I}} \subseteq \Delta \times \Delta$ *zugewiesen.*

Eine Interpretation erweitert sich induktiv auf alle Konzeptbeschreibungen:

$$\begin{aligned}
\top^{\mathcal{I}} &= \Delta \\
\bot^{\mathcal{I}} &= \emptyset \\
(C \sqcap D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cap D^{\mathcal{I}} \\
(C \sqcup D)^{\mathcal{I}} &= C^{\mathcal{I}} \cup D^{\mathcal{I}} \\
(\neg C)^{\mathcal{I}} &= \Delta \setminus C^{\mathcal{I}} \\
(\exists R.C)^{\mathcal{I}} &= \{x \in \Delta \mid \exists y : (x, y) \in R^{\mathcal{I}} \wedge y \in C^{\mathcal{I}}\} \\
(\forall R.C)^{\mathcal{I}} &= \{x \in \Delta \mid \forall y : (x, y) \in R^{\mathcal{I}} \Longrightarrow y \in C^{\mathcal{I}}\}
\end{aligned}$$

Damit ergibt sich die Gültigkeit folgendermaßen:

- *Ein Konzept* C *wird bzgl. des Modells* $\mathcal{I}$ *von* D subsumiert *(notiert* $C \sqsubseteq D$*), falls* $C^{\mathcal{I}} \subseteq D^{\mathcal{I}}$ *gilt.*
- *Die Konzepte* C *und* D *sind bzgl. des Modells* $\mathcal{I}$ äquivalent *(notiert* $C \equiv D$*), falls* $C^{\mathcal{I}} = D^{\mathcal{I}}$ *gilt.*
- *Ein Konzept heißt* erfüllbar *bzgl. des Modells* $\mathcal{I}$*, falls* $C^{\mathcal{I}}$ *nicht leer ist.*

Subsumption und Erfüllbarkeit stehen in enger Verbindung wie das folgende Theorem zeigt (Baader u. a., 2003, Theorem 2.13).

Theorem 9.9 *Seien* C *und* D *Konzepte, dann gilt:*

- C *wird von* D *subsumiert, gdw.* $C \sqcap \neg D$ *unerfüllbar ist.*
- C *und* D *sind äquivalent, gdw.* $C \sqcap \neg D$ *und* $\neg C \sqcap D$ *unerfüllbar sind.*
- C *und* D *sind disjunkt, gdw.* $C \sqcap D$ *unerfüllbar ist.*

Schmidt-Schauß und Smolka (1991) zeigten die Verbindungen der Beschreibungslogik zum Erfüllbarkeitsproblem der multimodalen Logik K, dessen Erfüllbarkeitsproblem als PSPACE-hart bekannt ist.

Theorem 9.10 *Das Erfüllbarkeitsproblem für* $\mathcal{ALC}$ *ist PSPACE-hart.*

Wir betrachten nun eine teilweise Einbettung der Beschreibungslogik in Membership Equational Logic. Wir können die elementaren Konzepte direkt als Teilsorten übernehmen. Die Rollen R betrachten wir als Prädikate $R(x, y)$, d.h. als

Abbildungen in die Sorte BOOL. Betrachten wir die Formelterme als Sortenbezeichner, dann können wir einige Formel direkt in Membership Equational Logic einbetten. Die Übersetzung $\phi(C)$ des Konzepts C ist folgendermaßen definiert.

$$\begin{array}{rcrcl}
\phi(C \sqcap D) & := & \forall x : (x \in C \wedge x \in D) & \Longrightarrow & x \in (C \sqcap D) \\
\phi(C \sqcup D) & := & \forall x : (x \in C \vee x \in D) & \Longrightarrow & x \in (C \sqcup D) \\
\phi(\top) & := & \forall x : \text{true} & \Longrightarrow & x \in \top \\
\phi(\bot) & := & \forall x : x \in \bot & \Longrightarrow & \text{false} \\
\phi(\exists R.C) & := & \forall x, y : (R(x,y) \wedge y \in C) & \Longrightarrow & x \in (\exists R.C)
\end{array}$$

Jede Subsortenbeziehung $x \in C \Longrightarrow x \in D$ spiegelt dabei die Subsumptionsbeziehung $C \sqsubseteq D$ der Konzeptdefinition wieder.

Die Konzeptebeschreibungen $(\neg C)$ und $\forall R.C$ sind dagegen nicht so ohne weiteres darstellbar, da man in Membership Equational Logic keine negierten Eigenschaften ausdrücken kann, so dass die folgende Darstellung der Negation sowie der Allquantifizierung keine Axiome ergeben:

$$\begin{array}{rcrcl}
\phi(\neg C) & := & \forall x : (\neg x \in C) & \Longrightarrow & x \in (\neg C) \\
\phi(\forall R.C) & := & \forall x, y : (\neg R(x,y) \vee y \in C) & \Longrightarrow & x \in (\forall R.C)
\end{array}$$

Dass die Negation nicht ausdrückbar ist, ergibt sich auch aus der Tatsache, dass Membership Equational Logic äquivalent zur Hornklausellogik mit Gleichheit ist und in Hornlogik Negation auch gesondert zu behandeln ist. Dies ist die in Prolog bekannte *negation as failure*-Semantik.

9.1.5 Rollenstrukturen

Ein Organisationsschema ist die Grundstruktur, innerhalb deren die Aktivitäten einer Organisation stattfinden. Die eigentlichen Aktivitäten werden durch Dienstnetze beschrieben. Dienstnetze sind Petrinetze, deren Transitionen Rollen zugeschrieben sind.

Rollen sind zunächst einmal nur Namen, deren Bedeutung sich erst später durch ihre Verknüpfung mit den Dienstnetzen ergeben. Sei *Rol* eine Menge von Rollen.

Nichtleere Teilmengen $R \subseteq \mathit{Rol}$ werden als *Rollenprofile* (kurz: Profile) bezeichnet. Die einelementigen Profile $\{r\}$ mit $r \in \mathit{Rol}$ werden mit der Rolle r identifiziert.

Definition 9.11 *Sei Rol eine Menge von Rollen. Die* Rollenstruktur *über Rol ist die durch Mengeninklusion partiell geordnete Menge* $\mathcal{R} := 2^{\mathit{Rol}} \setminus \{\emptyset\}$.

Rollenprofile können durch Vereinigung aggregiert werden. Sie sind durch Mengeninklusion partiell geordnet: Gilt $R_1 \subseteq R_2$ für zwei Rollenprofile $R_1, R_2 \in 2^{\mathit{Rol}}$, so ist R_2 umfassender als R_1, bzw. R_1 ist spezialisierter als R_2.

9.1.6 Dienstnetze als gefärbte Petrinetze

Dienstnetze sind algebraische Ablaufnetze. Sei N ein Ablaufnetz. Das Typsystem – die *Farbspezifikation* – wird durch die Datentyp-Spezifikation $\mathcal{S} =$

(Σ, X, E), bestehend aus einer Signatur $\Sigma = (K, \Omega, S)$, einer disjunkten Familie von Variablen $X = (X_k \mid k \in K)$ und einer Familie $E = (E_k \mid k \in K)$ von Axiomen, spezifiziert. Indem das Typsystem sowohl die Syntax der Datenobjekte als auch die Subtypisierungsbeziehungen formalisiert, nimmt es in Dienstnetzen die Aufgabe einer Agentenkommunikationssprache wahr.

Die Farbe einer Marke ist in algebraischen Petrinetzen ein Term einer Teilsorte s. Jede Farbsorte besitzt ihre eigenen Operatoren und Gleichungen in $\mathcal{S}$. Sei $A = (\llbracket K \rrbracket_A, \llbracket \Omega \rrbracket_A, \llbracket S \rrbracket_A)$ eine Theorie zur Datentypspezifikation $\mathcal{S}$.

Jede Stelle eines Dienstnetzes ist durch die Abbildung d typisiert, d.h. alle Marken auf p sind vom Typ $d(p)$. Die Kanten algebraischer Netze werden mit Termen $W(f)$ beschriftet, die Variablen enthalten können. Der Ausdruck ist dabei von der Sorte $d(p)$, d.h. $W(f) \in \mathbb{T}^{d(p)}_{\Sigma,E}(X)$. Dabei definieren wir $d(x, y) = d(x)$, falls $(x, y) \in P \times T$ und $d(x, y) = d(y)$, falls $(x, y) \in T \times P$.

Eine *Bindung* konkreter Ausdrücke an die Variablen ergibt einen speziellen Schaltmodus. Auf diese Weise beschreibt eine Transition eine Vielzahl an möglichen konkreten Transitionen. Die Transitionen sind mit Schaltptädikaten $G(t)$ versehen. Bindungen können durch Schaltprädikate weiter eingeschränkt werden: Ein Schalten ist unter einer Bindung nur dann möglich, wenn bezüglich der Bindung genügend Marken im Vorbereich vorhanden sind und die Bindung das Prädikat erfüllt.

Eine Markierung $M : P \to MS(\llbracket K \rrbracket_A)$ des Netzes ist eine Abbildung, die jeder Stelle einen Wert $M(p) \in MS(\llbracket d(p) \rrbracket_A)$ in der Algebra A zuweist, d.h. eine Multimenge über $\llbracket d(p) \rrbracket_A$.

Jeder Markierung M von D ordnen wir eine Projektionsmarkierung $\pi(M)$ zu, indem wir die Farbe der Marke vergessen und nur noch die Anzahl der Marken zählen:

$$\pi(M)(p) = |M(p)| \tag{9.2}$$

Wir verwenden π im folgenden auch in der Erweiterung auf Markierungsmengen.

Als Besonderheit der Dienstnetze wird jeder Transition t die Rolle $r(t) \in Rol$ zugewiesen. Dies bedeutet, dass zur Ausführung eines Tasks ein Agent, der diese Rolle inne hat, notwendig ist. Wir erweitern die Abbildung r auf Transitionsmengen, indem wir $R(T') = \{r(t) \mid t \in T'\}$ für jede Menge $T' \subseteq T$ definieren. Die Menge der an einer Interaktion N beteiligten Rollen ist $R(D) := R(N) := R(T_N)$.

Wir fordern, dass in Dienstnetzen die Rollen konfliktfrei verbunden sind, d.h. Vor- und Nachbereich einer Stelle enthalten jeweils Transitionen mit gleicher Rollenzuweisung:

$$\forall p \in P : |R({}^\bullet p)|, |R(p^\bullet)| \leq 1 \tag{9.3}$$

Jede Rolle $r \in R(D)$ des Dienstes soll dabei einem Aktivitätsanteil entsprechen, d.h. zu jedem r gibt es genau eine initiale Stelle p_r und genau eine finale Stelle p'_r, die dieser Rolle zugeordnet ist:

$$\forall r \in R(D) : \exists^1 p_r \in {}^\circ N : \exists^1 p'_r \in N^\circ : R(p_r{}^\bullet) = \{r\} = R({}^\bullet p'_r) \tag{9.4}$$

Eine Stelle p heißt *Kommunikationskanal*, wenn sie Transitionen unterschiedlicher Rollen verbindet, d.h. wenn $R(^\bullet p) \neq R(p^\bullet)$ gilt. Die Menge der Kommunikationskanäle zum Paar $(r_1, r_2) \in Rol^2$ ist:

$$P_{KK}(r_1, r_2) := \{p \mid R(^\bullet p) = \{r_1\} \wedge R(p^\bullet) = \{r_2\}\} \tag{9.5}$$

Auf Mengen verallgemeinert:

$$P_{KK}(R_1, R_2) := \bigcup_{r_1 \in R_1, r_2 \in R_2, r_1 \neq r_2} P_{KK}(r_1, r_2) \tag{9.6}$$

Die Menge der Kommunikationskanäle ist dann:

$$P_{KK}(D) := P_{KK}(R(D), R(D)) \tag{9.7}$$

Also gilt $p \in P_{KK}(D)$, wenn $R(^\bullet p) \neq R(p^\bullet)$ und $|R(^\bullet p)| = |R(p^\bullet)| = 1$ gilt.

Für Dienstnetze wird gefordert, dass die Rollen aus $R \subseteq R(D)$ mit dem Komplements $R(D) \setminus R$ durch einen Kommunikationskanal verbunden sind:

$$\begin{aligned} \forall R \in 2^{R(D)} \setminus \{\emptyset\} : \exists r_1 \in R : \exists r_2 \in R(D) \setminus R : \\ P_{KK}(r_1, r_2) \cup P_{KK}(r_2, r_1) \neq \emptyset \end{aligned} \tag{9.8}$$

Definition 9.12 *Sei Rol eine Rollenmenge. Ein* Dienstnetz

$$D = (N, A, d, W, G, M_0)$$

besteht aus den folgenden Komponenten:

1. *A ist eine Theorie zur Datentypspezifikation $\mathcal{S}$.*
2. *$N = (P, T, F)$ ist ein Ablaufnetz.*
3. *$d : P \to \bigcup_{k \in K} S_k$ ist die Stellentypisierung.*
4. *$W : F \to \mathbb{T}_{\Sigma,E}(X)$ ist die Kanteninschrift.*
5. *$G : T \to MEL_{\mathcal{S}}$ ist die Aktivierungsbedingung.*
6. *M_0 ist eine Initialmarkierung mit $\pi(M_0) = m_0$, wobei m_0 die kanonische Initialmarkierung von N ist.*

Das D zugrundliegende Ablaufnetz *wird mit $\pi(D) := N$ bezeichnet.*

Ein beschriftetes Dienstnetz $D = (N, A, d, r, W, G, M_0)$ besteht aus einem Dienstnetz zusammen mit der Rollenzuweisung $r : T \to Rol$, die (9.3) und (9.8) erfüllt.

Die Konzepte und Definitionen für Dienstnetze erweitern sich auf beschriftete Dienstnetze.

Die Schaltregel ergibt sich mit Hilfe von Variablenbindungen. Jede *Bindung* $\alpha : X \to [\![K]\!]_A$ mit $A = ([\![K]\!]_A, [\![\Omega]\!]_A, [\![S]\!]_A)$ der Variablen, die das Aktivierungsprädikat $G(t)$ der Transition t erfüllt, erzeugt einen *Schaltmodus*.

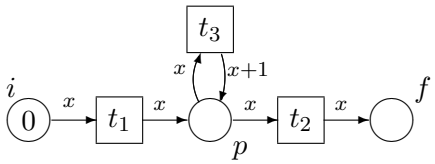


Abbildung 9.2: Ein unbeschränktes algebraisches Netz

Definition 9.13 *Eine Transition t unter der Variablenzuweisung $\alpha : X \to [\![K]\!]_A$ heißt genau dann in M* aktiviert*, wenn die Schaltbedingung erfüllt ist: $A, \alpha \models G(t)$ und für alle $p \in P$ auch $M(p) \geq \overline{\alpha}(W(p,t))$ gilt.*

Das Schalten der Transition t unter der Belegung α wird als $M \xrightarrow{t,\alpha} M'$ notiert, wobei sich die Nachfolgemarkierung *für jede Stelle $p \in P$ wie folgt ergibt:*

$$M'(p) = M(p) - \overline{\alpha}(W(p,t)) + \overline{\alpha}(W(t,p))$$

Aus der Schaltregel ergeben sich die Definitionen für Schaltfolgen, erreichbare Markierungen usw. analog zu einfachen Netzen. Schaltfolgen w sind Wörter über $(T \times (X \to [\![K]\!]_A))$, d.h. $w = (t_1, \alpha_1) \cdots (t_n, \alpha_n)$.

Ein Dienstnetz heißt *beschränkt*, wenn die Menge der erreichbaren Markierungen endlich ist. Man beachte, dass die Anzahl der Marken auf jeder Stelle in der Anzahl beschränkt sein kann, ohne dass das Netz selbst beschränkt sein muss, wie das Netz in Abbildung 9.3 zeigt.

Jeder Schaltvorgang eines algebraischen Netzes ist auch in den Projektionen möglich. Dies halten wir im folgenden Projektionslemma fest.

Theorem 9.14 *Sei D ein Dienstnetz, dann gilt für die Projektionen:*

$$M \xrightarrow[D]{t,\alpha} M' \Longrightarrow \pi(M) \xrightarrow[\pi(D)]{t} \pi(M')$$

und

$$\pi(RS(D, M_0)) \subseteq RS(\pi(D), \pi(M_0))$$

Beweis: Sei $M \xrightarrow[D]{t,\alpha}$. Dies ist nach Definition erfüllt, wenn $G(t)$ gilt und wenn für alle $p \in P$ gilt:

$$\begin{array}{ll} & M(p) \geq \overline{\alpha}(W(p,t)) \\ \Longleftrightarrow & \forall c \in [\![d(p)]\!]_A : M(p)(c) \geq \overline{\alpha}(W(p,t))(c) \\ \Longrightarrow & \sum_{c \in [\![d(p)]\!]_A} M(p)(c) \geq \sum_{c \in [\![d(p)]\!]_A} \overline{\alpha}(W(p,t))(c) \\ \Longleftrightarrow & |M(p)| \geq |\overline{\alpha}(W(p,t))| \\ \Longleftrightarrow & \pi(M)(p) \geq F(p,t) \end{array}$$

Also ist t auch in N aktiviert. Bei der Umformung haben wir $\pi(M(p)) = \pi(M)(p)$ und die Eigenschaft $|\overline{\alpha}(W(p,t))| = F(p,t)$ ausgenutzt. Für die Nach-

folgemarkierung gilt:

$$\begin{array}{ll} & M'(p) = M(p) - \overline{\alpha}(W(p,t)) + \overline{\alpha}(W(t,p)) \\ \iff & \forall c \in [\![d(p)]\!]_A : M'(p)(c) = M(p)(c) - \overline{\alpha}(W(p,t))(c) + \overline{\alpha}(W(t,p))(c) \\ \implies & \sum_{c \in [\![d(p)]\!]_A} M'(p)(c) = \sum_{c \in [\![d(p)]\!]_A} M(p)(c) - \overline{\alpha}(W(p,t))(c) + \overline{\alpha}(W(t,p))(c) \\ \iff & |M'(p)| = |M(p)| - F(p,t) + F(t,p) \\ \iff & \pi(M')(p) = \pi(M)(p) - F(p,t) + F(t,p) \end{array}$$

Also ist $\pi(M')$ die Nachfolgemarkierung von $\pi(M)$.

Die zweite Aussage folgt induktiv aus der ersten. q.e.d.

Aus der Eigenschaft $\pi(RS(D, M_0)) \subseteq RS(\pi(D), \pi(M_0))$ können wir leider nicht schließen, dass aus der Beschränktheit von $\pi(D)$ auch die Beschränktheit von D folgt, denn aus der Beschränktheit von $\pi(D)$ folgt die Endlichkeit von $RS(\pi(D), \pi(M_0))$ und aufgrund der Inklusion auch die Endlichkeit der Projektion $\pi(RS(D, M_0))$, jedoch impliziert letzteres nicht die Endlichkeit von $RS(D, M_0)$ selbst. So ist das Netz in Abbildung 9.2 unbeschränkt, da die Stelle p zwar maximal eine Marke enthält, so dass p in $\pi(D)$ beschränkt ist, die Marke aber eine beliebig große Zahl als Wert haben kann.

Die Umkehrung gilt auch nicht, denn Abbildung 9.3 ist ein beschränktes Dienstnetz D, dessen Projektion $\pi(D)$ unbeschränkt ist.

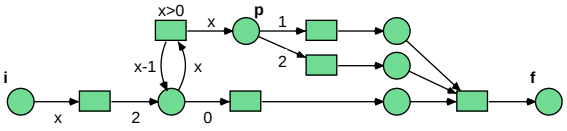


Abbildung 9.3: Ein beschränktes Dienstnetz

Theorem 9.15 *Sind die Farbdomänen alle endlich, so folgt aus der Beschränktheit von $\pi(D)$ auch die von D.*

Beweis: Aus der Beschränktheit von $\pi(D)$ folgt die Endlichkeit von $RS(\pi(D), \pi(M_0))$. Es gibt also nur endliche viele erreichbare Markierungen m. Nach Theorem 9.14 gilt $\pi(RS(D, M_0)) \subseteq RS(\pi(D), \pi(M_0))$ und $\pi(RS(D, M_0))$ ist eine endliche Menge. Da alle $[\![d(p)]\!]_A$ endlich sind, gibt es zu jedem m nur endlich viele Verteilungen der $M(p)(c)$, so dass $\pi(M) = \sum_{c \in [\![d(p)]\!]_A} M(p)(c) = m$ ist. Also ist für alle m die Menge $\{M \mid \pi(M) = m\}$ endlich. Also gibt es zu jedem $m \in \pi(RS(D, M_0))$ nur endliche viele Elemente in $RS(D, M_0)$, so auch $RS(D, M_0)$ endlich ist. Also ist D beschränkt. q.e.d.

9.1.7 Prozesse von Dienstnetzen

Prozesse von algebraischen Netzen – und damit auch von Dienstnetzen – ergeben sich analog zu Prozessen von P/T-Netzen. Ein Prozess ist ein Kausalnetz $K = (B, E, \prec)$ zusammen mit dem mit einem Abbildungspaar $\phi = (\phi_P : B \to P, \phi_T : E \to T)$, das jeder Bedingung von K eine Stelle des Netzes N zuweist und jedem

Ereignis eine Transition. Daneben wird noch mit $\phi_A : B \to A$ jeder Bedingung b ein Wert der Algebra zugewiesen und durch $\phi_\alpha : E \to (X \to A)$ jedem Ereignis seine Bindung.

Jeder Bedingungsmenge $Q \subseteq B$ wird durch ϕ_A und ϕ^P in natürlicher Weise eine eine Multimenge $\phi_A(Q) : P \to MSA$ zugeordnet, die jeder Stelle eine Multimenge von Farben zuweist. Sie ist für alle $p \in P$ und $c \in A$ definiert durch:

$$\phi_A(Q)(p)(c) := |\{b \in Q \mid \phi^B(b) = p \wedge \phi_A(b) = c\}| \tag{9.9}$$

Damit ein Ereignis $e \in E$ das Schalten der Transition $t = \phi_T(e)$ wiederspiegelt, muss dessen Guard $G(t)$ in der Bindung $\alpha = \phi_\alpha(e)$ gültig sein, und die Multimengen $\phi_A^\oplus(e^\bullet)(p)$ und $\phi_A^\oplus({}^\bullet e)(p)$ müssen für alle Stellen p den Kantengewichtungen $\alpha(W(p,t))$ bzw. $\phi_\alpha(e)(W(t,p))$ entsprechen (Hierbei ist $\phi_A^\oplus$ die homomorphe Erweiterung von ϕ_A auf Multimengen.)

Definition 9.16 *Ein Prozess des Dienstnetzes $D = (N, A, d, W, G, M_0)$ ist das Tupel (K, ϕ) mit $K = (B, E, \lessdot)$ und $\phi = (\phi_P, \phi_T, \phi_A, \phi_\alpha)$, wobei gilt:*

1. *(K, ϕ_P, ϕ_T) ist ein Prozess von N.*
2. *Der Prozess beschreibt den Anfangszustand:*
   $M_0(p)(c) = |\{b \in {}^\circ K : \phi^P(b) = p \wedge \phi_A(b) = c\}|$ für alle $p \in P$ und $c \in A$.
3. *$\phi_A : B \to A$ weist jeder Bedingung einen Wert der Algebra zu.*
4. *$\phi_\alpha : E \to (X \to A)$ weist jedem Ereignis seine Bindung zu.*
5. *Die Netzstruktur beschreibt das Schalten von $(\phi_T(e), \phi_\alpha)$:*

$$\begin{aligned} \forall e \in E : \quad & A, \phi_\alpha(e) \models G(\phi_T(e)) \wedge \\ & \forall p \in {}^\bullet\phi_T(e) : \phi_A^\oplus({}^\bullet e)(p) = \phi_\alpha(e)(W(p, \phi_T(e))) \wedge \\ & \forall p \in \phi_T(e)^\bullet : \phi_A^\oplus(e^\bullet)(p) = \phi_\alpha(e)(W(\phi_T(e), p)) \end{aligned}$$

Die Menge aller Prozesse von D wird mit $Proc(D)$ bezeichnet.
Die Menge aller Prozesse, die in eine terminale Markierung führen, ist

$$WFProc(D) := \{(K, \phi) \in Proc(D) \mid \pi(\phi(K^\circ)) = m_f\} \tag{9.10}$$

Hierbei meint π die Projektion einer gefärbten Markierung.

9.2 Korrektheit von Dienstnetzen

Wir definieren nun die Korrektheit eines Dienstnetzes. Intuitiv ist ein Dienst korrekt, wenn er erstens bei Termination keine unerledigten Aufgaben mehr vorweist, zweitens stets die Möglichkeit hat, einen begonnenen Ablauf zu einem terminierenden fortzusetzen und drittens keine nutzlosen Tätigkeiten spzifiziert.

Definition 9.17 *Ein Dienstnetz D heißt* korrekt, *wenn gilt:*

1. *Termination: Wird die finale Markierung übertroffen, so wird sie exakt erreicht.*

$$\forall M \in RS(D, M_0) : \pi(M) \geq m_f \Longrightarrow \pi(M) = m_f$$

2. *Fortsetzbarkeit: Von jeder aus der initialen Markierung erreichbaren Markierung ist die finale Markierung erreichbar.*

$$\forall M \in RS(D, M_0) : \exists M' \in RS(D, M) : \pi(M') = m_f$$

3. *Aktivierbarkeit: Jede beliebige Transition ist für eine Anfangsmarkierung aktivierbar.*

$$\forall t \in T : \exists M_0 : \pi(M_0) = m_0 \wedge \exists M \in RS(D, M_0) : M \xrightarrow{t}$$

Ein Dienstnetz D heißt strukturell korrekt*, wenn es für alle Anfangsmarkierungen M mit $\pi(M) = m_0$ korrekt ist.*

Wir betrachten nun die Eigenschaften von Dienstnetzen. Uns interessieren Antworten auf die folgenden Fragen: Können alle möglichen Ausführungen terminieren? In welchen Anfangsmarkierungen kann das Netz terminieren? Falls die Termination nicht garantiert ist, existiert dann eine Kontrollstrategie, so dass das so gesteuerte Netz stets terminiert? Diese Fragen wollen wir beantworten, indem wir die Verwandschaft der Dienstnetze zu den Worklflownetzen ausnutzen.

9.2.1 Relation von Dienst- zu Workflownetzen

Petrinetze sind ein etablierter Formalismus, um Abläufe zu beschreiben. Ein intensiv erforschter Anwendungsbereich stellen die Workflownetze nach (Aalst, 1997, 1998, 1999) dar. Workflownetze beschreiben die Abbarbeitung eines Auftrages, wobei der Beginn durch eine Marke auf der Initialstelle i angezeigt wird und die Bearbeitung durch die Markierung, bei der die Finalstelle f eine Marke enthält. Wir betrachten im folgenden die Verwandschaft der Dienstnetze zu Workflownetzen.

Definition 9.18 *Ein Workflow-Netz ist ein Petrinetz $N = (P, T, F)$, das genau eine Stelle $i \in P$ mit ${}^\bullet i = \emptyset$ und genau eine Stelle $f \in P$ mit $f^\bullet = \emptyset$ besitzt und für das jeder Knoten $n \in (P \cup T)$ auf einem Pfad zwischen i und f liegt.*

Von besonderem Interesse sind solche Netze, bei denen stets gewährleistet ist, dass der Geschätsprozess, egal, was bislang passiert ist, stets noch terminieren kann (angezeigt durch eine Marke auf f) und im Falle der Termination keine überschüssigen Marken mehr im Netz verbleiben. Weiterhin kann man noch fordern, dass jede Transition von der kanonischen Initialmarkeirung $m_0 = i$ aus potentiell aktivierbar ist, denn wäre sie das nicht, dann wäre sie überflüssig, was meist einen Modellierungsfehler darstellt.

Definition 9.19 *Ein Workflow-Netz $N = (P, T, F)$ heißt* korrekt*, wenn gilt:*

1. *Termination: Wird die finale Markierung übertroffen, so wird sie exakt erreicht.*
$$\forall m \in RS(N, m_0) : m_f \leq m \Longrightarrow m_f = m$$

2. *Fortsetzbarkeit: Von jeder aus der initialen Markierung erreichbaren Markierung ist die finale Markierung erreichbar.*
$$\forall m \in RS(N, m_0) : m_f \in RS(N, m)$$

3. *Aktivierbarkeit: Jede beliebige Transition ist aktivierbar.*
$$\forall t \in T : \exists m \in RS(N, m_0) : m \xrightarrow{t}$$

Korrektheit eines Workflows erfordert, dass von jeder erreichbaren Markierung exakt in m_f terminiert werden kann. Somit ist m_f die einzige Verklemmung. Für potentiell terminierende Workflows ist die Korrektheitbedingung dahingehend abgeschwächt, dass die finale Markierung von der initalen aus erreichbar ist, nicht jedoch unbedingt von jeder von der initalen aus erreichbaren Markierung. Es ist dann im allgemeinen notwendig, das Netz zu steuern (s.u.), um Verklemmungen zu vermeiden.

Die beiden Bedingungen der Termination und der Fortsetzbarkeit (auch als *schwache Korrektheit* bekannt) lassen sich zu einer Bedingungen an die erreichbaren Markierungen zusammenfassen:

$$\forall m \in RS(N, m_0) : (m_f \in RS(N, m)) \wedge (m_f \leq m \Longrightarrow m_f = m)$$

Die Abbildung 9.4 zeigt einen strukturierte Vorgehensweise zur Erzeugung korrekter Workflows auf. Hierzu wird der Workflow als iterierte Komposition generiert, die entweder sequentiell ($\alpha \cdot \beta$), alternativ ($\alpha + \beta$) oder parallel ($\alpha || \beta$) aus korrekten Workflows komponiert werden können. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Argumente bereits korrekte Workflows darstellen.

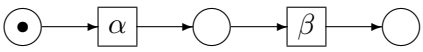
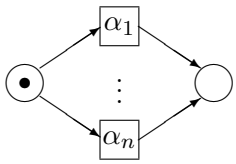
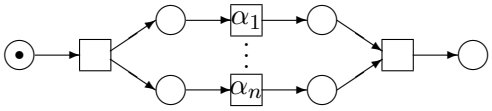
Operator	Petrinetz
Sequenz $\alpha \cdot \beta$	
Alternative $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i$	
Parallelität $\Vert_{i=1}^{n} \alpha_i$	

Abbildung 9.4: Komposition von Workflows

Korrektheit ist eine dynamische Eigenschaft, die nicht monoton ist (van Hee u. a., 2003). Ein Netz, das korrekt für die kanonische Initialmarkierung $m_0 = i$ ist, muss dies nicht für eine andere Markierung sein. Insbesondere kann bereits die Wahl $m = 2i$ die Korrektheit zerstören. So kann das Netz in Abbildung 9.5 von $m = 2{\cdot}i$ mit der Schaltfolge ac die Markierung $m' = p_1{+}p_2{+}p_3{+}p_4$ erreichen und dann mit der Transition e die Markierung $m'' = p_1 + p_4 + f$. Das Netz kann also die finale Stelle markieren, ohne dass das Netz geleert hinterlassen würde. Dies Beispiel zeigt auch an, dass man im allgemeinen keinen korrekten Workflow erhält, wenn man eine Transition durch einen korrekten Workflow verfeinert. Das Fehlen der Monotonie motiviert die Verschärfung der Korrektheitsdefinition für eine Vergößerung der Initialmarkierung zu $m = k \cdot i$: Ein Workflow-Netz N heißt *k-korrekt*, wenn von jeder aus der initialen Markierung $m_i = k \cdot i$ erreichbaren Markierung m die finale Markierung $m_f = k \cdot f$ erreichbar ist (Weitere Details finden sich in van Hee u. a., 2003).

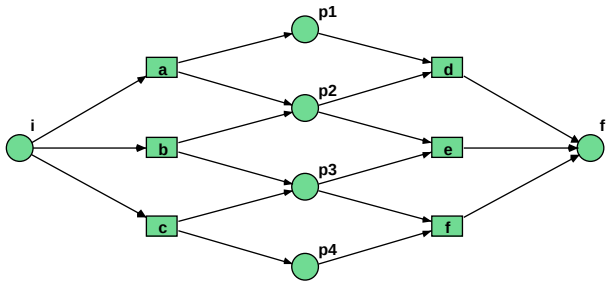


Abbildung 9.5: Ein Workflownetz

Ein Workflow-Netz N hat in der finalen Markierung einen Deadlock. Wir können das Netz jedoch neu starten, indem wir durch eine neu hinzugefügte Transition t_N die Marke in f wieder auf i zurücklegen. Diese Konstruktion wird als Abschluß N^* von N bezeichnet.

Definition 9.20 *Der Abschluß eines Workflow-Netz $N = (P, T, F)$ ist das Petrinetz $N^* = (P, T \cup \{t_N\}, F \cup \{(o, t_N), (t_N, i)\})$, wobei $t_N \notin (P \cup T)$ gilt.*

Das folgende Theorem zeigt, dass der Korrektheitsbegriff der Workflows eng mit klassischen Netzeigenschaften verbunden ist (vgl. Theorem 11 in Aalst, 1997).

Theorem 9.21 *Ein Workflow-Netz N ist genau dann korrekt, wenn sein Abschluß N^* in der Initialmarkierung m_0 beschränkt und lebendig ist.*

9.2.2 Reduktion von Ablaufnetzen auf Workflows

Aus der Definition folgt, dass Workflow-Netze spezielle Ablaufnetze sind, bei denen $|{}^\circ N| = |N^\circ| = 1$ gilt. Umgekehrt kann jedes Ablaufnetz durch das Hinzufügen einer intialen und einer finalen Transition in ein Workflow-Netz überführt werden. In ähnlicher Weise behandeln wir Dienstnetze, indem wir alle am Anfang alle Markierungen der minimalen Randstellen zu einem Tupel kombinieren,

das die neue Initialmarkierung auf der Stelle i darstellt. Diese Marke wird durch t_i auf die minimalen Randstellen verteilt. Umgekehrt kombiniert t_f alle Werte auf den maximalen Randstellen zu einem Tupel.

Definition 9.22 *Sei $N = (P, T, F)$ ein Ablaufnetz und sei $\{i, f\}$, $\{t_i, t_f\}$, P und T paarweise disjunkt, dann ist $\widetilde{N}$ das Netz:*

$$\widetilde{N} := (P \uplus \{i, f\}, T \uplus \{t_i, t_f\}, \widetilde{F})$$

mit $\widetilde{F} = F \cup \{(i, t_i), (t_f, f)\} \cup (\{t_i\} \times {}^\circ N) \cup (N^\circ \times \{t_f\}))$.

Sei $D = (N, A, d, W, G, M_0)$ ein Dienstnetz und sei ${}^\circ N = \{p_1, \ldots, p_n\}$ und $N^\circ = \{p'_1, \ldots, p'_{n'}\}$, dann ist der Abschluß von D definiert als der Dienst:

$$\widetilde{D} = (\widetilde{N}, A, \tilde{d}, \tilde{W}, \tilde{G}, \tilde{M}_0)$$

Dabei erweitern wir die Abbildungen folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
\tilde{d}(i) &= d(p_1) \times \cdots \times d(p_n) \\
\tilde{d}(f) &= d(p'_1) \times \cdots \times d(p'_{n'}) \\
\tilde{W}(t_i, p) &= x_p = \tilde{W}(p', t_f) \\
\tilde{W}(i, t_i) &= (x_{p_1}, \ldots, x_{p_n}) \\
\tilde{W}(t_f, f) &= (x_{p'_1}, \ldots, x_{p'_{n'}}) \\
\tilde{G}(t_i) &= \tilde{G}(t_f) = \text{true} \\
\tilde{M}_0(i) &= (M_0(p_1), \ldots, M_0(p_n))
\end{aligned}$$

Für beschriftete Dienstnetze wäre zudem noch die Rolle der neuen Transitionen zu definieren. Die Wahl wäre fast beliebig, solange sie nicht in D selbst vorkommt.

Mit Hilfe dieser Konstruktion kann jedes Dienstnetz auf ein Workflownetz reduziert werden.

Theorem 9.23 *Ist N ein Ablaufnetz, dann ist $\widetilde{N}$ ein Workflownetz.*
Ist D ein Dienstnetz, dann ist $\pi(\widetilde{D})$ ein Workflownetz.

Beweis: Folgt direkt aus den Definitionen 9.1, 9.12 und 9.18. q.e.d.

Im Vergleich mit D hat $\widetilde{D}$ nur zwei Gruppen zusätzlicher erreichbare Markierungen, nämlich die Initialmarkierung M_0 und die neuen Finalmarkierungen M_f, die $\pi(M_f) = m_f$ erfüllen. Analog hat $\widetilde{N}$ als korrekte Workflow im Vergeleich mit $N = \pi(D)$ nur m_i und m_f als zusätzliche Markierungen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass beide bezüglich der Korrektheit äquivalent sind:

Theorem 9.24 *Ein Dienstnetz D ist genau dann korrekt, wenn das Workflownetz $\widetilde{D}$ dies ist.*

Beweis: Zunächst einmal stellen wir fest, dass alle Schaltfolgen in $\widetilde{D}$ die folgende Form haben:

$$\widetilde{M_0} \xrightarrow[\widetilde{D}]{t_i} M_0 \xrightarrow[D]{w} M \quad \text{bzw.} \quad \widetilde{M_0} \xrightarrow[\widetilde{D}]{t_i} M_0 \xrightarrow[D]{w} M \xrightarrow[\widetilde{D}]{t_f} M', \text{ falls } \pi(M) = m_f$$

Also gilt: $M \in RS(D, M_0)$ impliziert $M \in RS(\widetilde{D}, \tilde{M}_0)$.

Für Korrektheit ist die Äquivalenz der Termination und Fortsetzbarkeit in D und $\widetilde{D}$ zu zeigen.

$\Longrightarrow$ Es gelte in D Termination und Fortsetzbarkeit:

$$\forall M \in RS(D, M_0) : \pi(M) \geq m_f \Longrightarrow \pi(M) = m_f$$
$$\forall M \in RS(D, M_0) : \exists M' \in RS(D, M) : \pi(M') = m_f$$

Dann ist für $\widetilde{D}$ analog zu zeigen:

$$\forall M' \in RS(\widetilde{D}, \widetilde{M_0}) : \pi(M') \geq \tilde{m}_f \Longrightarrow \pi(M') = \tilde{m}_f$$
$$\forall M'' \in RS(\widetilde{D}, \widetilde{M_0}) : \exists M''' \in RS(\widetilde{D}, M'') : \pi(M''') = \tilde{m}_f$$

a) Termination: Sei $M' \in RS(\widetilde{D}, \widetilde{M_0})$ eine beliebige Markierung, die $\pi(M') \geq \tilde{m}_f$ erfüllt. Jetzt impliziert $\pi(M') \geq \tilde{m}_f$, dass t_f geschaltet hat. Die Vorgängermarkierung M'' von M' ist aber in D final, erfüllt also $\pi(M'') \geq m_f$, woraus $\pi(M'') = m_f$ folgt, was wiederum $\pi(M') = \tilde{m}_f$ impliziert. Termination gilt also.

b) Fortsetzbarkeit: Ist M in D erreichbar, so auch in $\widetilde{D}$. Zu M existiert $M' \in RS(D, M)$ mit $\pi(M') = m_f$, das auch in $\widetilde{D}$ erreichbar ist. Schalten wir dann t_f in $\widetilde{D}$, so haben wir $\tilde{m}_f$ erreicht.

$\Longleftarrow$ Sei nun umgekehrt in $\widetilde{D}$ Termination und Fortsetzbarkeit gültig, dann ist dies auch für D zu zeigen:

a) Termination: Gilt $\pi(M') \geq \tilde{m}_f \Longrightarrow \pi(M') = \tilde{m}_f$, dann hat t_f geschaltet und die Vorgängermarkierung wurde exakt erreicht.

b) Fortsetzbarkeit: Ist M'' in $\widetilde{D}$ erreichbar, so markiert entweder M'' nur Stellen von D oder $M'' = \widetilde{M_0}$ oder M'' markiert auch f. Im ersten Fall kann stets ein (M''') mit $\pi(M''') = \tilde{m}_f$ erreicht werden, was impliziert, dass zuvor ein (M') mit $\pi(M') = m_f$ erreicht wurde. Im zweiten Fall kann M_0 erreicht werden und davon ein (M') mit $\pi(M') = m_f$. Im dritten Fall darf die Markierung M''' wegen der Gültigkeit der Terminationsbedingung sogar nur f markieren, so dass $\pi(M'') = \tilde{m}_f$ gilt, was impliziert, dass für die Vorgängermarkierung M'''' von M'' auch $\pi(M'''') = m_f$ gilt.

q.e.d.

Analog zu den Workflownetzen besteht eine enge Verbindung zwischen der Korrektheit des Dienstnetzes D und der Beschränktheit und Lebendigkeit des Abschlusses $\widetilde{D}^*$.

Theorem 9.25 *Ist $\widetilde{D}^*$ beschränkt und lebendig, dann ist das Dienstnetz D korrekt.*

Beweis: Ist $\widetilde{D}^*$ in M_0 beschränkt und lebendig, dann ist insbesondere t_N lebendig, und wir erreichen von jeder Markierung aus stets eine Markierung M, die

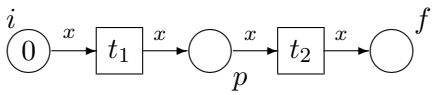


Abbildung 9.6: Ein beschränktes algebraisches Netz, dessen Abschluss nicht beschränkt ist

t_N aktiviert, also: $\pi(M) \geq m_f$. Dann muss aber auch $\pi(M) = m_f$ gelten, denn ansonsten könnte das Netz nicht beschränkt sein. Also gilt Fortsetzbarkeit und Termination. Beachten wir, dass t_N jede beliebige Anfangsmarkierung M_0' mit $\pi(M_0) = m_0$ generiert werden kann, so können wir aus der Lebendigkeit folgern, dass es für jede Transition t eine Anfangsmarkierung gibt, so dass t aktiviert werden kann. Also gilt die Aktivierungsbedingung. q.e.d.

Man beachte, dass die Beschränktheit für $\widetilde{D}^*$ gefordert wird und nicht für $\widetilde{D}$, denn es ist selbst für korrekte Netze nicht möglich, von der Beschränktheit von D auf die von D^* zu schließen. Dies gilt sogar in struktureller Formulierung: Sei $\widetilde{D}$ ein korrektes Dienstnetz, dass für alle M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ beschränkt ist, dann gilt im allgemeinen nicht auch noch, dass auch $\widetilde{D}^*$ beschränkt ist. Abbildung 9.6 zeigt ein korrektes, für alle M_0 beschränktes Dienstnetz, für das $\widetilde{D}^*$ nicht beschränkt ist, da die Stelle p jeden beliebigen Wert annehmen kann, da die Transition t_N eine beliebige Zahl als Anfangsmarkierung generieren kann.

Von der Korrektheit können wir auf die Lebendigkeit des Dienstnetzes schließen, nicht aber auf die Beschränktheit, denn das Dienstnetz aus Abbildung 9.2 ist korrekt und unbeschränkt. Die Umkehrung gilt daher nur in folgender eingeschränkter Form.

Theorem 9.26 *Wenn das Dienstnetz D strukturell korrekt ist, dann ist $\widetilde{D}^*$ für alle Markierungen M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ lebendig.*

Beweis: Betrachten wir ein strukturell korrektes Dienstnetz in einer Markierungen M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$. Ist das Netz strukturell korrekt, so ist mit der Fortsetzbarkeitseigenschaft von jeder erreichbaren Markierung $M \in RS(D, M_0)$ die finale Markierung M_f mit $\pi(M_f) = m_f$ erreichbar – unabhängig von der Wahl für M_0. Also ist t_N aktivierbar. Um zu zeigen, dass jede Transition t aktiviert werden kann, nutzen wir aus, dass t_N jede beliebige Anfangsmarkierung M_0' mit $\pi(M_0') = m_0$ generieren kann, und da D strukturell korrekt ist, gilt die Aktivierungsbedingung auch für M_0'. Die Aktivierungsbedingung garantiert, dass jede Transition t für mindestens eine Anfangsmarkierung $M_{0,t}$ aktiviert werden kann. Da diese von t_N generiert werden kann, ist $\widetilde{D}^*$ lebendig. q.e.d.

Wenn das Dienstnetz D korrekt oder strukturell korrekt ist, dann muss $\widetilde{D}^*$ jedoch nicht beschränkt sein, wie das unbeschränkte, aber strukturell korrekte Netz in Abbildung 9.2 zeigt.

Betrachten wir nur beschränkte Dienstnetze, so können wir Theorem 9.25 und 9.26 folgendermaßen zusammenfassen:

Theorem 9.27 *Sei $\widetilde{D}$ ein Dienstnetz, das für alle M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ beschränkt ist, dann gilt: Das Dienstnetz D ist genau dann strukturell korrekt, wenn $\widetilde{D}^*$ für alle Markierungen M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ lebendig ist.*

Beweis: Das Dienstnetz $\widetilde{D}$ ist genau dann strukturell korrekt, wenn D dies ist. Sei $\widetilde{D}$ für jedes M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ beschränkt.

Wenn das Dienstnetz $\widetilde{D}$ strukturell korrekt ist, dann ist es für alle M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ korrekt und damit ist $\widetilde{D}^*$ nach Theorem 9.26 auch für alle M_0 lebendig.

Für jedes beliebige M_0 mit $\pi(M_0) = m_0$ folgt aus der Lebendigkeit (zusammen mit der gegebenen Beschränktheit) in M_0 aus Theorem 9.25 die Korrektheit. Gilt Lebendigkeit für alle diese M_0, so folgt die Korrektheit für alle M_0, also die strukturelle Korrektheit. q.e.d.

9.3 Rollenkomponenten von Dienstnetzen

Die Definition von Workflownetzen hat also mit den Stellen i und f einen globalen Start- bzw. Endpunkt der Bearbeitung. Workflownetze modellieren somit eine zentralisierte Sichtweise auf den Geschätsprozess. Ist dagegen (wie in Abbildung 9.7) eine verteilte Bearbeitung durch verschiedene interagierende Akteure zu modellieren, so ist es notwendig, das System auf mehrere Anfangs- bzw. Endstellen zu verallgemeinern. Dies vereinfacht auch die Definition der Komposition von Abläufen.[3]

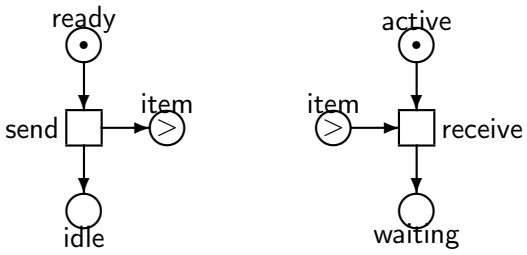


Abbildung 9.7: Producer/Consumer-Interaktion

Für zwei einfache Netze $N_i = (P_i, T_i, F_i), i = 1, 2$ ist die Komposition als komponentenweise Vereinigung zu definieren:

$$(N_1 \| N_2) = (P_1 \cup P_2, T_1 \cup T_2, F_1 \cup F_2)$$

Eine Komposition bezüglich gemeinsamer Stellen beschreibt eine asynchrone Kopplung der Systeme. Stellenfusion modelliert den gemeinsamen Zugriff zweier Komponenten auf ein geteiltes Objekt, z.B. auf einen Nachrichtenpuffer oder

[3] Komposition von Modulen zu größeren Einheiten wird an vielen Stellen bei der Softwareentwicklung genutzt. Insbesondere ein „bottom-up“ Vorgehen, das durch die Objektorientierung propagiert wird, besitzt als zentrales Element die Komposition von einfachen zu komplexen Objekten. Die Interaktion von vielen, vorgefertigten Objekten ist unter dem Begriff der Komponenten-Architekturen bekannt geworden (Griffel, 1998).

eine gemeinsam benutzte Ressource. Wenn die Transitionsmengen disjunkt sind, schränkt das Modell keine Fortsetzbarkeitseigenschaften ein, so dass die Kopplung als *schwache Komposition* bezeichnet wird. Für ein schwachgekoppeltes System übertragen sich alle Fortsetzbarkeitseigenschaften der Einzelkomponenten auf das Gesamtsystem. Die Eigenschaft der Fortsetzbarkeit ist gleichbedeutend mit der Forderung, dass das Transitionssystem der Komposition $N_1 \| N_2$ in der Einschränkung auf die Aktionen von N_1 das Transitionssystem von N_1 enthält. Eine Komposition fügt demnach nur Übergänge zwischen Zuständen hinzu. Es ist intuitiv klar, dass sich alle Fortsetzbarkeitseigenschaften der Einzelkomponenten auf ein schwachgekoppeltes System übertragen.

Neben der Verschmelzung von Stellen, welche die einfachste Modellierung einer asynchronen Kopplung darstellt, existiert das – im folgenden nicht verwendete – Konzept der Transitionsverschmelzung. Eine Transitionsverschmelzung beschreibt eine synchrone Aktion. Transitionverschmelzung koppelt zwei Systeme eng aneinander, der Raum der erreichbaren Zustände wird sowohl eingeschränkt als auch erweitert. Er wird eingeschränkt, indem Zustandsübergänge der Komponente N_1 direkt an einen Übergang von N_2 gebunden werden können. Ist dieser nicht möglich, so wird der Übergang auch in N_1 nicht mehr möglich sein. Er wird erweitert, indem N_2 durch Hinzufügen von Transitionen den Erreichbarkeitsgraph von N_1 erweitern kann.

Ebenso können wir Komposition $(D_1 \| D_2)$ zweier Dienstnetze $D_i = (N_i, A, d_i, r_i, W_i, G_i, M_i), i = 1, 2$ über der gleichen Algebra definieren. Dabei ist für die Komponierbarkeit zu fordern, dass die Anschriften auf den gemeinsamen Elementen übereinstimmen:

$$
\begin{array}{l}
d_1(p) = d_2(p) \text{ und } M_1(p) = M_2(p) \text{ für alle } p \in P_1 \cap P_2 \\
r_1(t) = r_2(t) \text{ und } G_1(t) = G_2(t) \text{ für alle } t \in T_1 \cap T_2 \\
W_1(f) = W_2(f) \text{ für alle } f \in F_1 \cap F_2
\end{array}
$$

Unter dieser Vorraussetzung ergibt sich die Komposition wie folgt:

$$(D_1 \| D_2) = (N_1 \| N_2, A, d_1 \cup d_2, r_1 \cup r_2, W_1 \cup W_2, G_1 \cup G_2, M_1 + M_2)$$

9.3.1 Netzkomponenten

In der folgenden Definition orientieren wir uns an der Komponentendefinition in (Kindler, 1997), bei denen Schnittstellen nur einseitig genutzt werden. Sie sind also entweder nur zum Lesen (Input) oder nur zum Schreiben (Output). Wir lassen im Vergleich zur Orginaldefinition hier die Spezifikation der Transitionen mit Fortschrittseigenschaft weg, da sie für uns nicht wichtig sind.

Definition 9.28 *Eine* Netzkomponente $\Gamma = (N, m_0, I, O)$ *besteht aus einem folgenden Komponenten:*

1. $N = (P, T, F)$ *ist ein* T*-schlichtes Petrinetz mit Markierung* $m_0 : P \to \mathbb{N}$.
2. $I, O \subseteq P$ *sind Mengen an Input- bzw. Output-Schnittstellen mit* ${}^\bullet T \cap O = T^\bullet \cap I = \emptyset$ *und* $m_0(p) = 0$ *für alle* $p \in I \cup O$.

Eine Komponente heißt geschlossen*, wenn* $I \cup O = \emptyset$ *gilt.*

Zwei Komponenten Γ_1 *und* Γ_2 *sind komponierbar, wenn* $(T_1 \cap T_2) = \emptyset$ *und* $(P_1 \cap P_2) \subseteq ((I_1 \cap O_2) \cup (I_2 \cap O_1))$ *gilt.*

Die Komposition zweier komponierbarer Komponenten ist:

$$\Gamma_1 \parallel \Gamma_2 := (N_1 \cup N_2, m_1 + m_2, I, O)$$

mit $I = ((I_1 \setminus O_2) \cup (I_2 \setminus O_1))$ *und* $O = ((O_1 \setminus I_2) \cup (O_2 \setminus I_1))$.

Beachte, dass aus der Forderung $(P_1 \cap P_2) \subseteq ((I_1 \cap O_2) \cup (I_2 \cap O_1))$ direkt die Gleichheit folgt, denn mit $I_i, O_i \subseteq P_i, i = 1, 2$ gilt die Einschachtelung:

$$(P_1 \cap P_2) \subseteq ((O_1 \cap I_2) \cup (O_2 \cap I_1)) \subseteq ((P_1 \cap P_2) \cup (P_2 \cap P_1)) = (P_1 \cap P_2)$$

Die Komposition zweier Komponenten ist wiederum eine. Offensichtlich ist die Komposition assoziativ und kommutativ, da die Mengenvereinigung dies ist.

Damit Prozesse definierbar sind, fordert Kindler, dass N auch *T-schlicht* ist, d.h. Transitionen sind nicht isoliert: $\forall t \in T : {}^\bullet t \neq \emptyset \wedge t^\bullet \neq \emptyset$. Prozesse einer Komponenten werden analog zu Prozessen von P/T-Netzen definiert. Die Definition unterscheidet jedoch zwischen den Ereignissen der Komponenten selbst und solchen, die die Umgebung erzeugt. In der folgenden Definition werden nur die Bedingungen abgebildet, während die Ereignisse implizit bleiben. Dies hat den Vorteil, dass externe Aktionen, deren Name unbekannt ist, nicht benannt werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass eine globale Obermenge $\mathcal{P}$ der Stellen existiert, damit die Komponenten eingebettet werden können.

Definition 9.29 *Sei* $\Gamma = (N, m_0, I, O)$ *eine Komponente mit* $N = (P, T, F)$. *Sei* $K = (B, E, \lessdot)$ *ein vorgängerendliches Kausalnetz und* $\phi : B \to \mathcal{P}$ *eine Abbildung, dann ist* (K, ϕ) *ein* Prozess *der Komponenten* Γ*, falls die folgenden Eigenschaften gelten:*

1. *Die minimalen Stellen* ${}^\circ K$ *beschreiben die Anfangsmarkierung:* $\phi({}^\circ K)|_P = m_0$.
2. *Für jedes Ereignis* $e \in E$ *gilt eine der beiden Bedingungen:*
   a) *Interne Aktion: Es existiert eine Transition* $t \in T$*, so dass* $\phi^\oplus({}^\bullet e) = {}^\bullet t$ *und* $\phi^\oplus(e^\bullet) = t^\bullet$.
   b) *Externe Aktion: Für alle Stellen* $x \in \mathcal{P}$ *gilt* $\phi({}^\bullet e)(x) \leq 1$ *und* $\phi(e^\bullet)(x) \leq 1$. *Aus* $\phi({}^\bullet e)(x) = 1$ *folgt* $x \in O \cup (\mathcal{P} \setminus P)$ *und* $\phi(e^\bullet)(x) = 1$ *impliziert* $x \in I \cup (\mathcal{P} \setminus P)$.

Die Menge aller Prozesse von Γ *wird mit* $Proc(\Gamma)$ *bezeichnet.*

Man beachtet, dass nach Bedingung (1) die minimalen Stellen ${}^\circ R$ auch andere Stellen beschreiben können, d.h. eine Bedingung $b \in {}^\circ R$ kann Stellen außerhalb der Komponenten beschreiben: $\phi(b) \in \mathcal{P} \setminus P$.

Mit dieser Definition der Komponentensemantik entspricht das Verhalten der Komposition $\Gamma_1 \parallel \Gamma_2$ dem Durchschnitt der Einzelverhalten (vgl. Kindler, 1997, Proposition 10).

Theorem 9.30 *Seien Γ_1, Γ_2 zwei komponierbare Komponenten, dann gilt:*

$$Proc(\Gamma_1 \parallel \Gamma_2) = Proc(\Gamma_1) \cap Proc(\Gamma_2)$$

Dieses Theorem charakterisiert die Semantik der Komponenten als kompositional, d.h. die Semantik der Komposition ergibt sich direkt als der Durchschnitt der Semantiken der Komponenten.

9.3.2 Rollenkomponenten von Diensten

Sei $N = (P, T, F)$ das dem Dienstnetz zugrundeliegende Netz und sei $R \subseteq R(N)$ eine Teilmenge der im Netz vorkommenden Rollen. Dann können wir das Netz auf den Teil einschränken, der alle R zugeordneten Transitionen und deren umliegende Stellen enthält. Das resultierende Netz bezeichnen wir als R-Komponente. Rollenkomponenten stellen den Dienst dar, der von der Rolle R erbracht wird. Sie stellen implizit eine Spezifikation der Rechte und der Pflichten, die mit dieser Rolle verbunden sind, dar.

Der Vorteil von Rollenkomponenten von Diensten gegenüber beliebigen Komponenten ist, dass wir in voraus wissen, welche Komponenten auftreten können.

Definition 9.31 *Sei $D = (N, A, d, r, W, G, M_0)$ ein Dienst mit $N = (P, T, F)$ und sei $R \subseteq R(D)$.*

- *Die R-*Komponente *von N ist das durch $T_R := r^{-1}(R)$ und $P_R := ({}^\bullet T_R \cup T_R{}^\bullet)$ induzierte Teilnetz von N, das mit $N[R]$ bezeichnet wird.*
- *Jedes Teilnetz $N' = (P', T', F')$ von N induziert das Dienstnetz:*

$$D|_{N'} = (N', A, d|_{P'}, r|_{T'}, W|_{F'}, G|_{T'}, M_0|_{P'}) \tag{9.11}$$

- *Ist $N' = N[R]$ speziell eine Rollenkomponente, dann ist $D[R] := D|_{N'}$ die R-*Komponente *von D.*
- *Die Menge der Kommunikationskanäle, mit denen die Rolle R mit der Umgebung kommuniziert, ist dann:*

$$P_{KK}(R) = P_{KK}(R, R(D) \setminus R) \cup P_{KK}(R(D) \setminus R, R) \tag{9.12}$$

Sei $\mathcal{E} = \{R_1, \ldots, R_n\}$ eine Mengenpartition der Rollen $R(D)$ eines Dienstnetz D. Sie erzeugt eine Menge an Rollenkomponenten: $D[R_1], \ldots, D[R_n]$. Für den Spezialfall $\mathcal{E} = \{R, \bar{R}\}$ für ein beliebiges $R \subseteq R(N)$ und mit $\bar{R} := R(N) \setminus R$ sprechen wir für die Aufteilung von $N = N[R] \cup N[\bar{R}]$ kurz von der R-Zerlegung von N.

Wir definieren eine Komposition auf Dienstnetzen unter der Voraussetzung, dass die Dienste disjunkte Transitionsmengen haben, als komponentenweise Vereinigung.

Theorem 9.32 *Sei D ein Dienst und sei $R_1, R_2 \subseteq R(D)$ mit $R_1 \cap R_2 = \emptyset$, dann gilt:*

$$N[R_1 \cup R_2] = N[R_1] \| N[R_2]$$

Beweis: Da R_1 und R_2 disjunkt sind, sind auch $T_{N[R_1]}$ und $T_{N[R_2]}$ disjunkt. Es gilt:

$$\begin{aligned} T_{N[R_1 \cup R_2]} &= r^{-1}(R_1 \cup R_2) \\ &= r^{-1}(R_1) \cup r^{-1}(R_2) \\ &= T_{N[R_1]} \cup T_{N[R_2]} \\ &= T_{N[R_1] \| N[R_2]} \end{aligned}$$

Außerdem ist:

$$\begin{aligned} P_{N[R_1 \cup R_2]} &= {}^\bullet T_{N[R_1 \cup R_2]} \cup T_{N[R_1 \cup R_2]}{}^\bullet \\ &= ({}^\bullet T_{N[R_1]} \cup {}^\bullet T_{N[R_2]}) \cup (T_{N[R_1]}{}^\bullet \cup T_{N[R_2]}{}^\bullet) \\ &= ({}^\bullet T_{N[R_1]} \cup T_{N[R_1]}{}^\bullet) \cup ({}^\bullet T_{N[R_2]} \cup T_{N[R_2]}{}^\bullet) \\ &= P_{N[R_1]} \cup P_{N[R_2]} = P_{N[R_1] \| N[R_2]} \end{aligned}$$

Da die Stellen und Transition übereinstimmen, generieren $N[R_1 \cup R_2]$ und $N[R_1] \| N[R_2]$ die gleichen Teilnetze. q.e.d.

Die R-Komponenten $D[R_i]$ beschreiben den Dienst D vollständig, in dem Sinne, dass wir das Netz aus seinen Komponenten rekonstruieren können: $N = N[R_1] \parallel \cdots \parallel N[R_n]$.

Theorem 9.33 *Sei D ein Dienstnetz und $N = \pi(D)$ ohne isolierte Stellen. Für jede Mengenpartition $\mathcal{E}$ der Rollen $R(D)$ gilt:*

$$N = \Big\|_{R \in \mathcal{E}} N[R] \quad \textit{und} \quad D = \Big\|_{R \in \mathcal{E}} D[R]$$

Beweis: Wir zeigen zunächst $N = \|_{R \in \mathcal{E}} N[R]$. Da $\mathcal{E}$ eine Partition ist, gilt $\bigcup_{R \in \mathcal{E}} R = R(D)$ und damit auch:

$$\bigcup_{R \in \mathcal{E}} T_{N[R]} = \bigcup_{R \in \mathcal{E}} r^{-1}(R) = T$$

Hier gilt sogar, dass alle $T_{N[R]}$ disjunkt sind. Dies ist notwendig, damit die Komposition der $N[R]$ überhaupt definiert ist.

Da N ohne isolierte Stellen ist, gilt ${}^\bullet p \cup p^\bullet \neq \emptyset$, und damit folgt:

$$\bigcup_{R \in \mathcal{E}} P_{N[R]} = \bigcup_{R \in \mathcal{E}} ({}^\bullet T_{N[R]} \cup T_{N[R]}{}^\bullet) = P$$

Die $P_{N[R]}$ sind nicht nowendigerweise disjunkt.

Sei $(p,t) \in F \cap (P \times T)$, dann gibt es genau eine Rolle R, so dass $(p,t) \in F_{N[R]}$, da t in genau einem $N[R]$ vorkommt. Analog für $(t,p) \in F \cap (T \times P)$. Also gilt

$$\bigcup_{R \in \mathcal{E}} F_{N[R]} = F$$

Damit ist $N = \|_{R \in \mathcal{E}} N[R]$ klar, da die Knotenmenge vom N von denen der $N[R]$ überdeckt wird und alle $N[R]$ Teilnetze von N sind.

Da sich $D[R]$ stets als Einschränkung von D ergibt, folgt $D = \|_{R \in \mathcal{E}} D[R]$ aus $N = \|_{R \in \mathcal{E}} N[R]$, denn alle Abbildung auf geteilten Elementen sind konsistent definiert. q.e.d.

Die Teilnetze ergeben somit eine Überdeckung, die aber im allgemeinen nicht disjunkt ist, da die Kommunikationsstellen geteilt werden.

R-Komponenten erweisen sich als Komponenten im Sinne von Definition 9.28. Dazu definieren wir die Kommunikationskanäle als Schnittstellen. Kommunikationskanäle sind Stellen, die Transitionen unterschiedlicher Rollen verbinden: $R({}^\bullet p) \neq R(p^\bullet)$ gilt.

Die initialen und finalen Stellen eines Dienstes sind leicht zu ermitteln. Stellen sind initial, wenn ${}^\bullet p = \emptyset$ gilt. Sie sind final, wenn $p^\bullet = \emptyset$ gilt. Die Bedingung an die Rollentypisierung

$$\forall p \in P : |R({}^\bullet p)|, |R(p^\bullet)| \leq 1$$

impliziert für Stellen mit ${}^\bullet p, p^\bullet \neq \emptyset$ bereits $\forall t_1, t_2 \in {}^\bullet p : r(t_1) = r(t_2)$ und $\forall t_1, t_2 \in p^\bullet : r(t_1) = r(t_2)$, nicht jedoch $\forall t_1 \in {}^\bullet p : \forall t_2 \in p^\bullet : r(t_1) = r(t_2)$. Gilt die letzte Bedingung, dann verbindet die Stellen zwei Transitionen, die in der gleichen R-Komponenten liegen, die Stelle ist also intern. Gilt die Bedingung nicht, dann liegen die Transitionen in verschiedenen R-Komponenten, die Stelle ist also eine Kommunikationsstelle. Somit können alle Stellen eindeutig als Initial-, Terminal-, Binnen- oder als Kommunikationsstellen identifizert werden.

Definition 9.34 *Sei D ein Dienst und $N[R] = (P_R, T_R, F_R)$ seine R-Komponente. Definiere $\Gamma_D[R] := (N[R], m_0^R, I^R, O^R)$ mit*

$$\begin{aligned}
I^R &= \{p \in P_{KK}(N) \mid p^\bullet \subseteq T_R\} \\
O^R &= \{p \in P_{KK}(N) \mid {}^\bullet p \subseteq T_R\} \\
P_i^R &= \{p \in P \mid R({}^\bullet p) = \emptyset \wedge p^\bullet \subseteq T_R\} \\
P_f^R &= \{p \in P \mid R(p^\bullet) = \emptyset \wedge {}^\bullet p \subseteq T_R\} \\
m_0^R(p) &= 1, \textit{ falls } p \in P_i^R \textit{ und } 0 \textit{ sonst}
\end{aligned}$$

Theorem 9.35 *Wenn D ein Dienst und $N[R]$ eine R-Komponente ist, dann ist $\Gamma_D[R]$ eine Komponente nach Definition 9.28.*

Beweis: Es ist $I^R \subseteq P_R$ zu zeigen: Es gilt $I^R \subseteq P_R$, denn $p^\bullet \subseteq T_R$ impliziert $p \in ({}^\bullet T_R \cup T_R{}^\bullet) = P_R$. Analog folgt $O^R \subseteq P_R$, $P_i^R \subseteq P_R$ und $P_i^R \subseteq P_R$.

Wir zeigen ${T_R}^\bullet \cap I^R = \emptyset$: Sei $p \in I^R$, dann gilt nach Definition $R({}^\bullet p) \neq R(p^\bullet) \wedge p^\bullet \subseteq T_R$. Da für Kommunikationsstellen stets $|R({}^\bullet p)| = |R(p^\bullet)| = 1$ gilt, ist $R({}^\bullet p) = \{r_1\}$ und $R(p^\bullet) = \{r_2\}$ für $r_1 \neq r_2$. Da $p^\bullet \subseteq T_R$ gilt, muss $R(p^\bullet) \subseteq R$ sein, d.h. $r_2 \in R$ und $r_1 \notin R$. Aus $r_1 \notin R$ folgt dann ${}^\bullet p \cap T_R = \emptyset$. Dies ist gleichbedeutend mit $(_ F_R p) = \emptyset$. Also gilt in $N[R]$ auch ${}^\bullet I^R = \emptyset$ und dies ist gleichbedeutend mit ${T_R}^\bullet \cap I^R = \emptyset$. Analog zeigt man $O^R \cap {}^\bullet T_R = \emptyset$.

Damit ist $\Gamma_D[R]$ eine Komponente. q.e.d.

9.3.3 Prozesse für Rollenkomponenten

Da für Komponenten eine Prozessdefinition existiert, können wir daher dies auch auf Rollenkomponenten übertragen:

$$\mathit{Proc}(N[R]) := \mathit{Proc}(\Gamma_D[R]) \tag{9.13}$$

Wir erweitern das Konzept der Komponentenprozesse, die keine feste Umgebung annehmen, nun auf die Komponenten $D[R]$ eines Dienstnetzes. Dabei nutzen wir aus, dass Rollenkomponenten eines Dienstnetzes die Komponente $\Gamma_D[R]$ definiert, die eine Komponente nach Definition 9.28 ist. Es ist daher naheliegend, die Definition der Komponentenprozesse aus Definition 9.36 zu verallgemeinern. Dies geschieht analog zur Definition der Dienstprozesse in Definition 9.16. Dazu nehmen an, dass alle globalen Stellen $p \in \mathcal{P} \setminus P$ auch einen Typ $d(p)$ besitzen.

Definition 9.36 *Sei D ein Dienstnetz und $R \subseteq R(D)$ eine Rolle. Ein* Prozess von $D[R]$ *ist das Tupel (K, ϕ) mit $K = (B, E, \prec)$ und $\phi = (\phi_P, \phi_A)$, wobei gilt:*

1. *Der Prozess beschreibt in der Einschränkung auf $P \subseteq \mathcal{P}$ den Anfangszustand M_0 von $D[R]$:*

   $M_0(p)(c) = |\{b \in {}^\circ D[R] : \phi^P(b) = p \wedge \phi_A(b) = c\}|$ *für alle $p \in P$ und $c \in A$.*

2. *$\phi_A : B \to A$ weist jeder Bedingung einen typgerechten Wert der Algebra zu: $\phi_A(p) \in [\![d(p)]\!]$ für alle $p \in \mathcal{P}$.*

3. *Für jedes Ereignis $e \in E$ gilt eine der beiden Bedingungen:*

   a) *Interne Aktion: Es existiert eine Transition $t \in T$ und eine Bindung α, so dass e das Schalten von (t, α) beschreibt:*

   $$\begin{array}{rcl} A, \alpha \models G(\phi_T(e)) & \wedge & \forall p \in {}^\bullet t : \phi_A^\oplus({}^\bullet e)(p) = \alpha(W(p,t)) \\ & \wedge & \forall p \in t^\bullet : \phi_A^\oplus(e^\bullet)(p) = \alpha(W(t,p)) \end{array}$$

   b) *Externe Aktion: Für alle Stellen $x \in \mathcal{P}$ gilt $\phi({}^\bullet e)(x) \leq 1$ und $\phi(e^\bullet)(x) \leq 1$. Aus $\phi({}^\bullet e)(x) = 1$ folgt $x \in O \cup (\mathcal{P} \setminus P)$ und $\phi(e^\bullet)(x) = 1$ impliziert $x \in I \cup (\mathcal{P} \setminus P)$.*

Die Menge aller Prozesse von $D[R]$ wird mit $Proc(D[R])$ bezeichnet.

Die Prozessdefinition für die gefärbten Dienstnetze ergibt sich als kanonische Erweiterung:

Theorem 9.37 *Wenn $(K, (\phi_P, \phi_A))$ ein Prozess von $D[R]$ ist, dann ist (K, ϕ_P) eine Komponentenprozess von $\Gamma_D[R]$.*

Beweis: Direkt aus dem Vergleich von Definition 9.36 mit Definition 9.29. q.e.d.

Da die Komposition zweier Rollenkomponenten $D[R_1] \| D[R_2]$ erzwingt, dass die Anschriften konsitent sind, können wir ganz analog zu Theorem 9.30 folgern, dass sich das Verhalten der Komposition als der Durchschnitt der Einzelverhalten ergibt:

Theorem 9.38 *Seien $D[R_1], D[R_2]$ zwei komponierbare Komponenten mit $R_1 \cap R_2$, dann gilt:*

$$Proc(D[R_1] \parallel D[R_2]) = Proc(D[R_1]) \cap Proc(D[R_2])$$

9.3.4 Verfeinerungsstruktur auf Dienstnetzen

Sei $D = (N, A, d, r, W, G, M_0)$ ein Dienstnetz. Wir hatten Stellen in (9.7) als Kommunikationskanäle definiert, wenn sie Transitionen mit unterschiedlichen Rollen verbinden.

Wenn wir uns fragen, ob sich Dienste ähnlich verhalten, dann bezieht sich die Verhaltensähnlichkeit stets auf die Kommunikationen. Da Nachrichten Stellen, also passive Elemente sind, können wir mit ihnen nicht direkt eine Verhaltensähnlichkeit definieren. Dies lässt sich aber leicht erreichen, wenn wir mit jeder Nachricht ein Ereignis assozieren. Dazu verfeinern wir jede Nachricht p, indem wir sie in zwei Stellen p^{in} und p^{out} aufspalten, die durch die Transition t_p verbunden werden. Die Stellen p^{in} und p^{out} haben den gleichen Typ wie p. An den Kanten (p^{in}, t_p) und (t_p, p^{out}) notieren wir jeweils die gleiche Variable x, so dass jede Marke von p^{in} zu p^{out} geschaltet werden kann. Man erkennt sofort, dass bis auf einfache Umbenennungen sich das Verhalten des Netzes durch diese Transformation nicht ändert, denn jede Markierung M spaltet sich für jeden markierten Kommunikationskanal p in die Markierungen M^{in} und M^{out} auf, die im Erreichbarkeitsgraph nur durch die t_p verbunden sind. Da Kommunikationsstellen nie initial sind, sind sie in allen Anfangsmarkierungen unmarkiert, so dass wir die Markierung von p^{in} und p^{out} die leere Multimenge ist. Für Dienstnetze mit Rollenanschrift sind zudem noch die neuen Transitionen mit einer beliebigen, bislang unvewendeten Rolle zu beschriften.

Definition 9.39 *Sei $D = (N, A, d, W, G, M_0)$ ein Dienstnetz. Die* Kommunikationserweiterung *von D bezüglich der Rolle $R \subseteq R(D)$ ist das Dienstnetz:*

$$\hat{D}(R) = (N', A, d', W', G', M_0')$$

Dabei ist $N' = (P', T', F')$ und die Abbildungen d, r, W, G, M_0 modifizieren wir folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
P' &= (P \setminus P_{KK}(R)) \cup \{p^{in}, p^{out} \mid p \in P_{KK}(R)\} \\
T' &= T \cup \{t_p \mid p \in P_{KK}(R)\} \\
F' &= F \cup \{(p^{in}, t_p), (t_p, p^{out}) \mid p \in P_{KK}(R)\} \\
d'(p^{in}) &= d'(p^{out}) = d(p) \\
W'(p^{in}, t_p) &= x = W'(t_p, p^{out}) \qquad x \in X_{d(p)} \\
M_0'(p^{in}) &= M_0'(p^{out}) = \mathbf{0}
\end{aligned}$$

Wir wollen nun definieren, wann zwei Dienste bezüglich ihres Kommunikationsverhaltens äquivalent sind. Der hier verwendte Äquivalenzbegriff beruht auf dem Konzept der *Bisimulation* (vgl. Park, 1980; Milner, 1989). Zwei Systemzustände P und Q sind bisimilar (notiert als $P \sim Q$), wenn jeder Zustandsübergang $P \xrightarrow{a} P'$ im anderen System durch eine den Zustandsübergang $Q \xrightarrow{a} Q'$ simuliert werden kann und P' und Q' wiederum bisimilar sind. Bisimulation kann durch die Forderung, dass folgendes Diagramm durch die Existenz einer Konfiguration Q' (bzw. P' im symmetrischen Fall) kommutativ ist, dargestellt

werden:

$$\begin{array}{ccc} P & \sim & Q \\ a\downarrow & & \downarrow a \\ P' & \sim & Q' \end{array}$$

Haben wir zwei Dienste D_1 und D_2, dann müssen diese, um ähnlich sein zu können, auf jeden Fall die gleichen Kommunikationskanäle besitzen. Daraus folgt, dass beide Dienste die gleichen hinzugefügten Transitionen t_p besitzen. Auf diesen Aktionen definieren wir dann eine Bisimulation $\approx$ bezüglich der Markierungen der beiden Dienste. Hierbei müssen wir von den internen Aktionen der Dienstnetze abstrahieren, d.h. von allen nicht kommunikativen Transitionen. Diese Form der Bisimilarität heißt *Kommunikationsäquivalenz*. Dazu definieren wir den löschenden Homomorphismus h mit:

$$h(t,\alpha) = \begin{cases} (t,\alpha), & \text{falls } t = t_p, p \in P_{KK}(D) \\ \lambda, & \text{sonst} \end{cases}$$

Wir definieren mit Hilfe des Homomorphismus h eine weitere Übergangsrelation $\stackrel{\widehat{\cdot}}{\rightarrow}$, die beliebig viele interne Schritte vor und nach einer Kommunikationstransition erlaubt:

$$M_1 \xrightarrow[\widehat{D}(R)]{\widehat{t,\alpha}} M_2 : \Longleftrightarrow \exists w : M_1 \xrightarrow[\widehat{D}(R)]{w} M_2 \wedge h(w) = (t,\alpha)$$

Definition 9.40 *Seien D_1 und D_2 zwei Dienstnetze und $R_1 \subseteq R(D_1)$ und $R_2 \subseteq R(D_2)$ Teilmengen ihrer Rollen, die die gleichen Kommunikationskanälen generieren, d.h. $P_{KK}(R_1) = P_{KK}(R_2) =: KK$.*

*Sei M_1 eine Markierungen von D_1 und M_2 eine Markierungen von D_2. M_1 und M_2 sind KK-*kommunikationsbisimilar*, notiert als $M_1 \approx_{KK} M_2$, falls $(M_1, M_2) \in \mathcal{B}$ für eine Kommunikationsbisimulation $\mathcal{B}$ gilt.*

Eine binäre Relation $\mathcal{B}$ auf heißt Kommunikationsbisimulation*, falls für alle $(M_1, M_2) \in \mathcal{B}$ gilt:*

1. *Wenn $M_1 \xrightarrow[\hat{D}_1(R_1)]{\widehat{t,\alpha}} M_1'$ gilt, dann existiert ein M_2', so dass $M_2 \xrightarrow[\hat{D}_2(R_2)]{\widehat{t,\alpha}} M_2'$ und $(M_1', M_2') \in \mathcal{B}$ gilt.*

2. *Wenn $M_2 \xrightarrow[\hat{D}_2(R_2)]{\widehat{t,\alpha}} M_2'$ gilt, dann existiert ein M_1', so dass $M_1 \xrightarrow[\hat{D}_1(R_1)]{\widehat{t,\alpha}} M_1'$ und $(M_1', M_2') \in \mathcal{B}$ gilt.*

Die Dienste D_1 und D_2 sind KK-kommunikationsbisimilar, notiert als $D_1 \approx_{KK} D_2$, falls für die Initalmarkierungen $M_{0,1}$ und $M_{0,2}$ die Bisimulation $M_{0,1} \approx_{KK} M_{0,2}$ gilt.

Die Rollenkomponenten $D_1[R_1]$ und $D_2[R_2]$ sind kommunikationsbisimilar*, notiert als $D_1[R_1] \simeq D_2[R_2]$, wenn $KK := P_{KK}(R_1) = P_{KK}(R_2)$ gilt und für alle $i, j \in \{1, 2\}$ die Kompositionen $D_1[R_1] \| D_i[R(D_i) \backslash R_i]$ und $D_2[R_2] \| D_j[R(D_j) \backslash R_j]$ KK-kommunikationsbisimilar sind.*

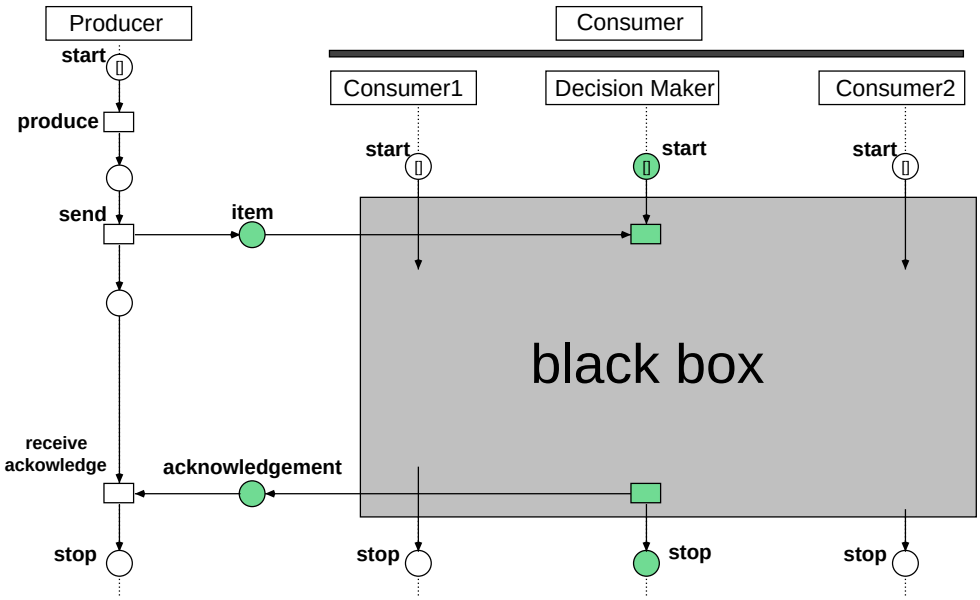


Abbildung 9.8: Verfeinerung der Rolle *Consumer*

Man erkennt leicht, dass $\approx_{KK}$ eine Äquivalenzrelation ist. Man beachte, dass für die Definition der Simulation die erweiterten Netze $\hat{D}_i(R_1), i = 1, 2$ und nicht die Dienstnetze D_i selbst verwendet werden.

Wir erweitern die Kommunikationsbisimulation auch auf Komponenten, um auszudrücken, dass eine Rollenkomponente die Aufgabe einer anderen übernehmen kann. Erweitern wir beispielsweise die Rolle *Consumer* im Dienstnetz aus Abbildung 9.1 – wie in Abbildung 9.8 angedeutet. Verfeinerung heißt hierbei, dass wir eine Rolle durch eine Menge von Rollen ersetzen, ohne dass sich dabei das beobachtbare Verhalten ändert. Rollenverfeinerung dedeutet also keine Verfeinerung des Verhaltens, denn dieses ändert sich ja gerade nicht.

Konkret kann es sich bei dieser Verfeinerung besipielsweise um das Dienstnetz PC_2 aus Abbildung 9.9 handeln, das eine Verfeinerung des Producer/Consumer-Dienstnetzes PC aus Abbildung 9.1 darstellt. Die Rollen $R_2 = \{Consumer_1, Consumer_2, DecisionMaker\}$ des Dienstnetzes PC_2 verfeinern das Verhalten der Rolle *Consumer* im Dienstnetz PC.

Analog stellt das Dienstnetz PC_3 aus Abbildung 9.10 eine Verfeinerung der Rolle $\{Producer\}$ durch die Rolle $R_1 = \{Producer_1, Producer_2\}$ dar. Eine Kompositionen der beiden Teilverfeinerungen ist in Abbildung 9.11 dargestellt.

Man beachte, dass das der Rolle $Consumer_1$ zugeordnete Teilnetz zwar isomorph zu der Komponente der Rolle *Consumer*, aber nicht mit identisch ist. Dies kann auch nicht sein, denn die Rolle R_2 interagiert bereits extern über Kommunikationskanäle (hier: item und acknowledgement) mit der Rolle *Producer* und diese sind unterschiedlich zu denen, die $Consumer_1$ nutzt.

Eine Übersicht über die Dienst/Rollen-Beziehungen in den Dienstnetzen PC_1, PC_2 und PC_3 ist in Abbildung 9.12 dargestellt. Die Transitionen modellieren

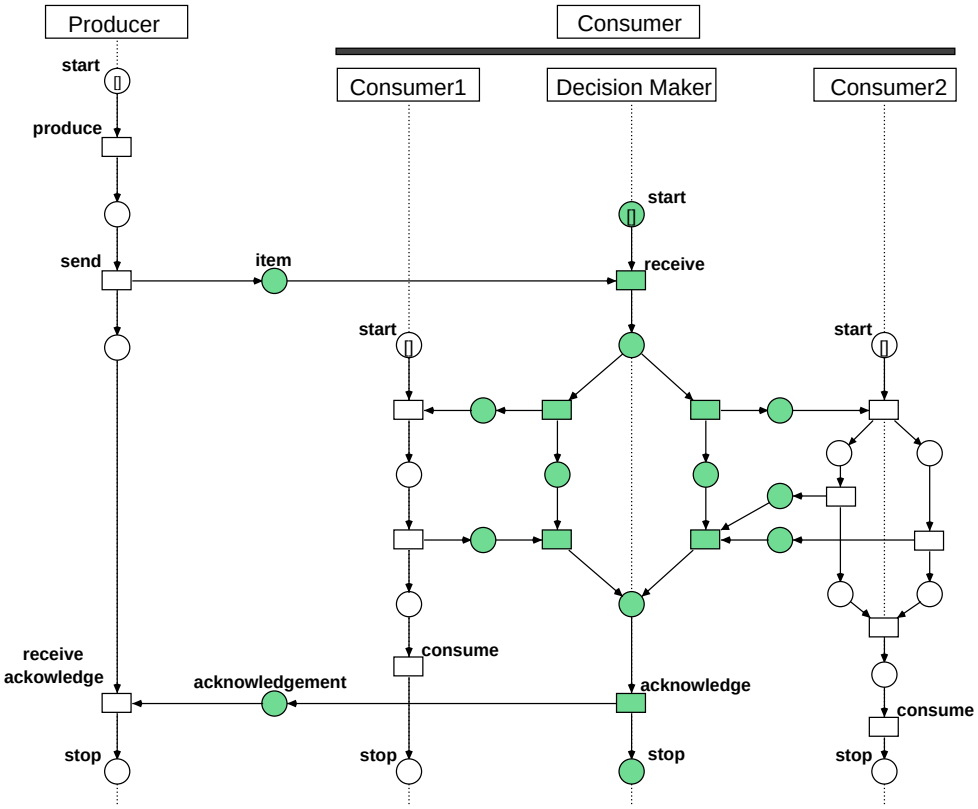


Abbildung 9.9: PC_2: Verfeinerung der Rolle *Consumer*

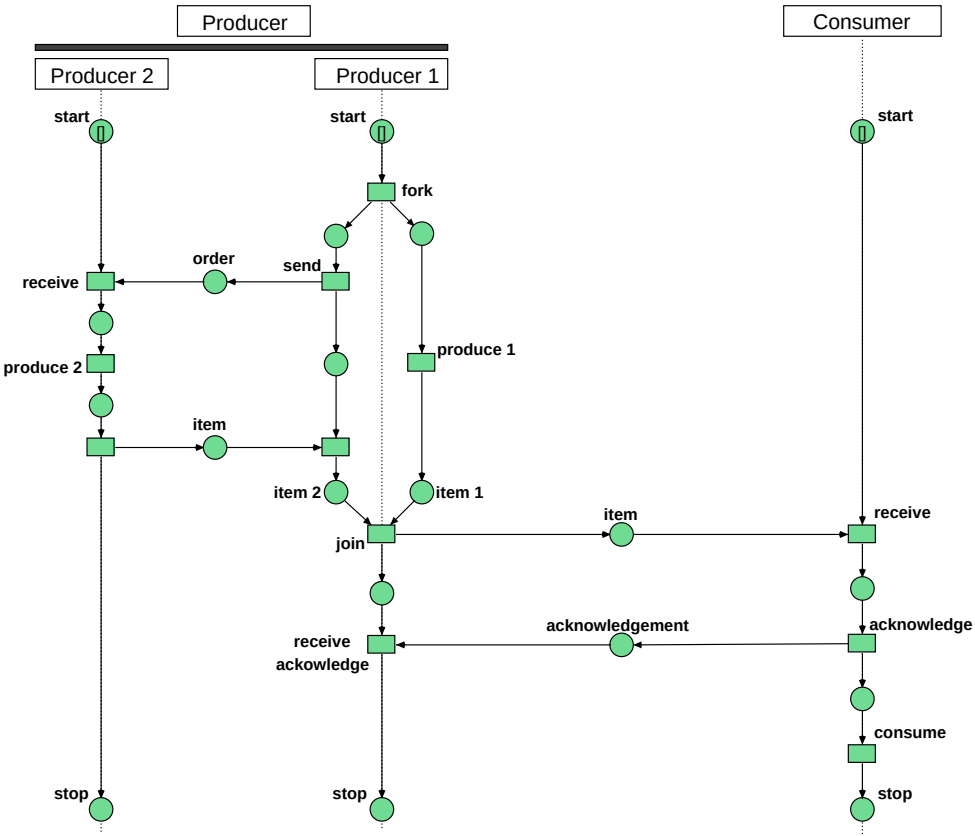


Abbildung 9.10: PC_3: Verfeinerung der Rolle *Producer*

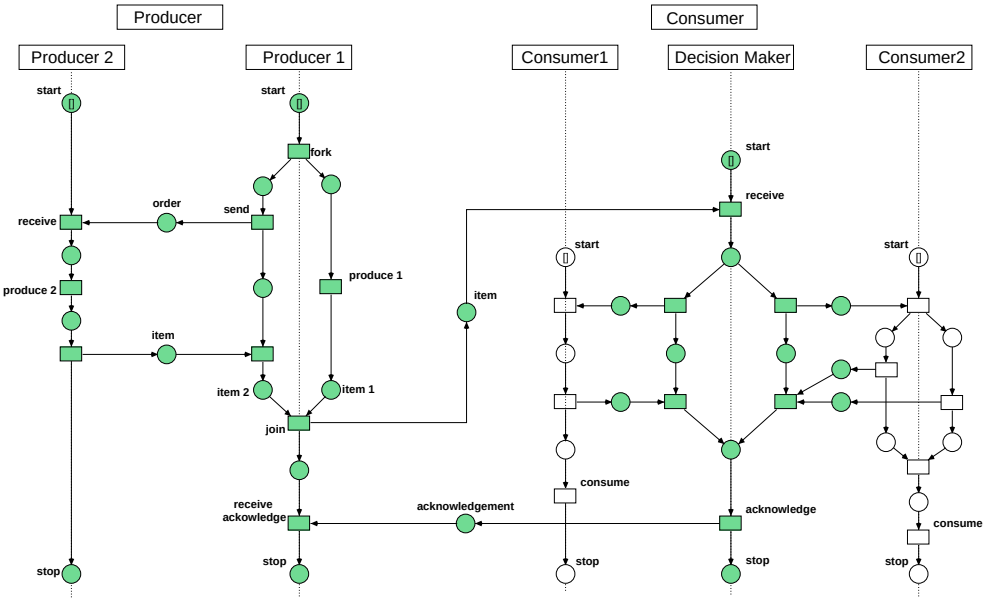


Abbildung 9.11: Die Komposition $PC_4 = PC_3[R_1] \| PC_2[R_2]$

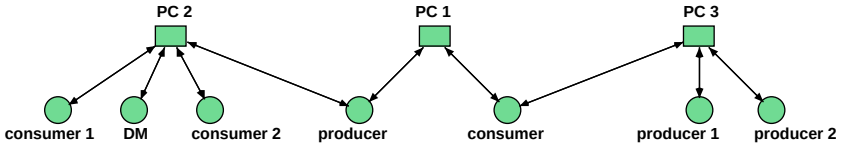


Abbildung 9.12: Übersicht über die Dienst/Rollen-Beziehungen

die Dienstnetze, die Stellen die beteiligten Rollen und die Kanten die Existenz von sendenden und empfangenden Kommunikationskanälen.

9.4 Formale Analyse und Steuerung von Diensten

Zur Spezifikation des Verhaltens hat sich die Verwendung temporaler Logik etabliert. Temporallogiken sind spezielle Modallogiken (Hughes und Cresswell, 1984). Die Gültigkeit temporallogischer Aussagen wird zumeist durch eine *Zustandsraumanalyse* bewiesen. Die als Zustandsraumanalyse (engl. model checking) bekannte Technik geht auf die unabhängig voneinander entwickelten Grundlagen von Emerson und Clarke (1982) sowie Queille und Sifakis (1981) zurück.[4] Die von Emerson und Clarke vorgestellte *Computation Tree Logic* (CTL) wurde in vielen weiteren Arbeiten in der Ausdruckmächtigkeit erweitert. Beispiele sind CTL* (Emerson, 1990) und ACTL (Grumberg und Long, 1994). Weitere Ansätze stellen das μ-Kalkül nach Park (1976) und die Hennessy-Milner-Logik (Hennessy und Milner, 1980) dar. Die *Linear Time Logic* (LTL) nach Gabbay u. a. (1980) stellt einen weiteren logikbasierten Ansatz dar, die die Grundlage für einen prominenten Ansatz zur Verifikation reaktiver Systeme nach Manna und Pnueli (1995) darstellt. Zentrale Stärke der LTL gegenüber der CTL ist die Behandlung von starken Fairness-Eigenschaften. Verwandte Arbeiten sind auch das Unity-System nach Chandy und Misra (1989) und die Arbeit von Lamport (1977), die in die *temporal logics of actions* (TLA) (Lamport, 1994) mündete.

9.4.1 Temporallogik für sequentielle Modelle

Die Klasse der zustandsbasierten Logiken ist sehr verbreitet, da sie direkt auf den Modallogiken (vgl. Hughes und Cresswell, 1984) aufbauen können. Das Standardmodell der modalen Logik ist die Kripke-Struktur (W, R), die aus einer Menge an Welten W und deren Verbindungen, dargestellt durch die Relation $R \subseteq W^2$, besteht. Zustandsaussagen lassen sich direkt als Abbildungen von der Menge der Welten in die Menge der Zustände definieren. Die hohe mathematische Formalisierung der Modallogiken begründet die starke Verbreitung der zustandsbasierten Temporallogiken. Zustandsbasierte Temporallogiken lassen sich in zwei Klassen aufteilen: Temporallogiken auf der Basis einer linearen Zeit – wie beispielsweise LTL – sowie auf Basis einer vorwärts verzweigenden Zeit, wie die Logik CTL*. Der Reiz dieser Logiken liegt in ihrer algorithmischen Fundierung.

[4] Eine Einführung zu Ansätzen im Bereich der Zustandsraumanalyse finden sich z.B. bei Shankar (1998).

Siehe dazu die Arbeit von Emerson und Clarke (1982) für CTL und die Darstellung nach Pnueli und Lichtenstein (1985) für LTL. Für den Zusammenhang von temporaler Logik zu ω-regulären Sprachen sowie der Automatentheorie siehe Vardi und Wolper (1994) oder Thomas (1990).

Definition 9.41 *Die Menge der* CTL* *-Formeln CTL$^*(X)$ über einer Menge atomarer Aussagen X ist die Menge aller Pfadformeln:*

1. *Jede atomare Aussage $x \in X$ ist eine Zustandsformel.*
2. *Sind p und q Zustandsformeln, so auch $\neg p$, $(p \vee q)$ und $\mathbf{E}\, p$.*
3. *Jede Zustandsformel ist eine Pfadformel*
4. *Sind P, Q Pfadformeln, dann auch $\neg P$, $(P \vee Q)$, $\circ P$ und $(P\ \mathbf{U}\ Q)$.*

Weitere Operatoren sind von den bestehenden abgeleitet: Wir definieren true $:= (x \vee \neg x)$ für ein beliebiges Atom und false $:= \neg$true. Der *eventually*-Operator $\Diamond$ ist ebenfalls abgeleitet:

$$\Diamond\psi \quad := \quad (\text{true}\ \mathbf{U}\ \psi)$$

Der „leads to"-Operator ist definiert als $\psi \rightsquigarrow \phi := \Box(\psi \Longrightarrow \Diamond\phi)$.

Die bestehenden Operatoren besitzen duale Operatoren:

$$\begin{aligned}
\neg(\phi \wedge \psi) &:= (\neg\phi \vee \neg\psi) \\
\neg\Box\phi &:= \Diamond\neg\phi \\
\neg(\phi\ \mathbf{U}\ \psi) &:= (\neg\psi\ \mathbf{R}\ \neg\phi) \\
\neg\mathbf{A}\ \psi &:= \mathbf{E}\ \neg\psi \\
\neg\circ\psi &= \circ\neg\psi
\end{aligned}$$

Die Logik CTL (Emerson und Clarke, 1982) ist eine Einschränkung von CTL*, derart, dass eine Zustandsmodalität nur in Kombination mit einer Pfadmodalität erlaubt ist, d.h. dass beispielsweise **E** nur zusammen mit **U** auftreten darf. Durch diese Einschränkung besitzt CTL ein Fixpunkt-Charakterisierung, was die Grundlage einer effizienten Prozedur für die Zustandsraumanalyse bildet (siehe McMillan, 1993).

Hauptvertreter der Temporallogiken auf der Basis einer linearen Zeit ist die Linear Time Logic (LTL) nach Gabbay u. a. (1980) bzw. Manna und Pnueli (1995). Zentrale Stärke der LTL gegenüber CTL ist die Behandlung von starken Fairness-Eigenschaften. Die temporale Logik LTL formalisiert nur Zustandsaussaugen, die in allen möglichen Sequenzen gültig sein müssen. LTL ist eine Teillogik von CTL*, bei der keine Pfadquantoren verwendet werden. LTL kann somit als Einschränkung von CTL* verstanden werden, da LTL über allen verzweigenden Pfaden interpretiert wird, d.h. eine LTL-Formel ψ entspricht der CTL*-Formel $\mathbf{A}\ \psi$, wobei ψ keine Pfadquantoren enthalten darf.

Das *Kripkemodell* $M = (K, \alpha, z_s)$ dieser Logik besteht aus einer Kripke-Struktur $K = (Z, \rightarrow)$ zusammen mit einer Bewertungsfunktion $\alpha : Z \rightarrow 2^X$, die

jedem Zustand die Menge der gültigen Atome zuweist, und dem Initialzustand $z_s \in Z$. Die Welten der Kripkestruktur werden im Kontext der Temporallogik als Zustände und die Relation zwischen Welten als Zustandsübergänge interpretiert. Die Gültigkeit von Aussagen wird auf Aktionssequenzen von K definiert, wobei die Kripkestrukur als Graph verstanden wird. Um nicht zwischen endlichen und unendlichen Abwicklungen unterscheiden zu müssen, nehmen wir an, dass jeder Zustand mindestens einen Nachfolger hat. Dies ist keine Einschränkung, da jedes System in diese Form bringen können, indem ein neuer Zustand hinzugefügt wird und dieser der Nachfolger aller Zustände wird, die zuvor keinen hatten. Somit können wir uns auf die unendlichen Sequenzen beschränken. Sei σ eine unendliche Sequenz von Zustandsübergängen:

$$\sigma = z_0 z_1 z_2 \cdots \quad \text{mit} \quad \forall i \in \mathbb{N} : z_i \to z_{i+1}$$

Der Pfad σ_k ist definiert als der Pfad, der im k-ten Zustand von σ beginnt:

$$\sigma_k = z_k z_{k+1} \cdots$$

Sei $\Sigma(z)$ die Menge aller unendlichen Zustandssequenzen, die mit z beginnen.

Die Gültigkeit von Zustandsaussagen ergibt sich relativ zu einem Zustand z_0. So bedeutet $\mathbf{E}\, p$, dass von diesem Zustand ein Pfad σ ausgeht, der p erfüllt. Die Gültigkeit von Pfadaussagen wird auf Pfaden interpretiert. Gültigkeit notieren wir als $M, \sigma \models P$. Ist das Modell klar, so notieren wir nur kurz $\sigma \models P$. Die Aussage $\bigcirc P$ beschreibt, dass P im Nachfolgezustand z_1 gilt, $P\ \mathbf{U}\ Q$ (engl. *until*) beschreibt, dass in einem erreichbaren Zustand z_n das Prädikat Q gelten wird und dass in allen Zwischenzuständen z_i die Aussage P gilt.

Definition 9.42 *Sei $M = (K, \alpha, z_s)$ ein Modell. Die Gültigkeit einer* CTL**-Formel P in einem Pfad $\sigma = z_0 z_1 \cdots$ wird mit $M, \sigma \models P$. Sie ist folgendermaßen definiert:*

$$\begin{array}{lcl}
M, z_0 \models x & \iff & x \in \alpha(z_0) \\
M, z_0 \models \neg p & \iff & M, z_0 \not\models p \\
M, z_0 \models (p \vee q) & \iff & M, z_0 \models p \text{ oder } M, z_0 \models q \\
M, z_0 \models \mathbf{E}\, p & \iff & \exists \sigma \in \Sigma(z_0) : M, \sigma \models p \\
M, \sigma_k \models p & \iff & z_k \models p \\
M, \sigma_k \models \neg P & \iff & M, \sigma_k \not\models P \\
M, \sigma_k \models (P \vee Q) & \iff & M, \sigma_k \models P \text{ oder } \sigma_k \models Q \\
M, \sigma_k \models \bigcirc P & \iff & M, \sigma_{k+1} \models P \\
M, \sigma_k \models (P\ \mathbf{U}\ Q) & \iff & \exists n \geq k : M, \sigma_n \models Q \wedge \forall k \leq i < n : M, \sigma_i \models P
\end{array}$$

Eine Aussage P ist gültig, notiert $M \models P$, wenn sie in z_0 gültig ist.

Die Korrektheitsbedingung für Workflownetze ist ein gutes Beispiel für eine Spezifikation mittels Temporallogik. Wollen wir nicht ausschließlich korrekte Workflow-Netzen betrachten, sondern wollen wir auch solche Workflow-Netze zulassen, die nicht notwendigerweise korrekt sind, weil sie in einigen, aber nicht in allen erreichbaren Markierungen terminieren können, dann müssen wir sie steuern, weil sie die Terminierungsbedingungen verletzen.

Dies können wir mit der folgenden Formel beschreiben, die alle Schaltfolgen beschreibt, die ψ erfüllen und gleichzeitig stets die Option zu terminieren besitzen.

$$\forall M \in RS(D, M_0) : \psi \wedge \exists M' \in RS(D, M) : \pi(M') = m_f \tag{9.14}$$

Wählen wir speziell $\psi = \pi(M) \geq m_f \Longrightarrow \pi(M) = m_f$, so beschreibt (9.14) gerade die Bedingungen der Termination und Fortsetzbarkeit, die für die Korrektheit gefordert sind (vgl. Definition 9.17).

Definieren wir das Atom x_f und seine Belegung als $x_f \in \alpha(M) \iff (\pi(M) = m_f)$, dann können wir diese Eigenschaft in der Temporallogik CTL$^*(X)$ formulieren:

$$\mathbf{A}\,\Box(\psi \wedge \mathbf{E}\,\Diamond\, x_f) \tag{9.15}$$

9.4.2 Temporallogik für partiell geordnete Modelle

Wir haben bislang Temporallogiken betrachtet, die auf dem Modell total geordneter Ereignisse basiert. In einem Petrinetz-Prozess ist die Nebenläufigkeit unmittelbar zu erkennen, denn jeder Stellen-Schnitt C aktiviert im Allgemeinen eine Menge U an Transitionen, die dann alle nebenläufig zueinander sind, d.h. in einer Sequentialiserung könnte jede Transition $e \in U$ als „erste“ vorkommen. Aufgrund dieser direkten Repräsentation sind die ersten Ansätze für eine temporale Logik partiell geordneter Zustände auf Basis von Petrinetz-Prozessen definiert. Zentrale Arbeiten zu diesem Komplex stammen von Reisig (1988), von Esparza (1994) und von Kindler (1995), die die topologische Unterteilung von Sicherheits- und Lebendigkeitseigenschaften von linearen auf partielle Ordnungen übertragen.

Gerade die Berücksichtigung von Nebenläufigkeit erscheint in vielen Ansätzen als natürliche Antwort auf das Problem der „Zustandsraumexplosion“. Beispielsweise besitzt die Komposition n unabhängiger Binärvariablen einen Zustandsraum mit 2^n Zuständen („Explosion des Zustandsraums“). Sei der Initialzustand $(0, \ldots, 0)$. Es existieren $n!$ Sequentialisierungen, die im sequentiellen Modell alle n Variablen nebenläufig von 0 nach 1 ändern. Es ist für dieses Beispiel jedoch gar nicht notwendig, alle diese Sequenzen zu überprüfen, da sie alle den gleichen Prozess beschreiben. Unabhängigkeit von Zuständen und Ereignissen wird im Bereich des „partial order model checking“ ausgenutzt, um den Suchraum zu verkleinern (siehe dazu Clarke u. a., 1989; Valmari, 1990, 1994; Godefroid, 1996; Larsem und Thomson, 1991; Grumberg und Long, 1994). Halbordnungssemantiken sind ein Ansatz, um ungeordnete Ereignisse direkt als solche zu behandeln, ohne alle ihre Sequentialisierungen zu betrachten. Diese Reduktion resultiert in einer geringeren algorithmischen Komplexität. Eine solche Betrachtung zu partiellen Ordnungen findet sich bei Bradfield (1992), McMillan (1993) und Godefroid (1996).

Die partielle Ordnung macht einen weiteren (im einfachen, sequentiellen Fall überflüssigen) Operator notwendig, der berücksichtigt, dass mehrere Zustände der direkte Nachfolger sein können. (siehe dazu Desel u. a., 1992). Dieser Operator verallgemeinert den Operator $\circ$ und wird durch $\textcircled{\scriptsize\vee}$ notiert. Die Aussage $\textcircled{\scriptsize\vee}\psi$

beschreibt, dass eine Eigenschaft in einem der direkt erreichbaren Folgezustände gilt. Der Operator $\Diamond$ besitzt auch einen dualen Operator $\Box$, definiert durch $\Box\psi := \neg\Diamond\neg\psi$, der besagt, dass eine Eigenschaft in allen direkten Folgezuständen gilt. Betrachten wir die Erweiterung von LTL für partielle Ordnungen nach Kindler (1995):

Definition 9.43 *Die Menge $LTL_{po}(X)$ der LTL-Formeln für partielle Ordnungen über einer Menge atomarer Aussagen X ergibt sich induktiv.*

1. *Jede atomare Aussage $x \in X$ ist eine $LTL_{po}(X)$-Formel.*
2. *Sind P, Q $LTL_{po}(X)$-Formeln, dann auch $\neg P$, $(P \vee Q)$, $\Diamond P$ und $(P \mathbf{U} Q)$.*

Diese Logik wird durch die durch Prozesse eines Petrinetzes interpretiert. Das *Prozessmodell* $M = (Proc(N), \alpha)$ für $LTL_{po}(X)$ besteht aus der Menge aller Prozesse π eines Netzes N und einer Bewertungsfunktion $\alpha = (\alpha_\pi : \mathcal{C}_\pi \to 2^X \mid \pi \in Proc(N))$, die jedem Stellenschnitt C des Prozesses π die Menge der gültigen atomaren Aussagen zuweist.

Definition 9.44 *Sei $M = (Proc(N), \alpha)$ ein Prozessmodell für $LTL_{po}(X)$ und sei $\pi = (K, \phi) \in Proc(N)$ ein Prozess. Die Gültigkeit einer temporalen Aussage P in einem Stellenschnitt $C \in \mathcal{C}_\pi$ ist induktiv definiert:*

$$
\begin{array}{lcl}
\pi, C \models x & \iff & x \in \alpha_\pi(C) \\
\pi, C \models \neg P & \iff & \pi, C \not\models P \\
\pi, C \models (P \vee Q) & \iff & \pi, C \models P \text{ oder } \pi, C \models Q \\
\pi, C \models \Diamond P & \iff & \exists C' \in \mathcal{C}_K : C \to C' \wedge \pi, C' \models P \\
\pi, C \models (P \mathbf{U} Q) & \iff & \exists C' \in \mathcal{C}_K : C \xrightarrow{*} C' \wedge \pi, C' \models Q \wedge \\
 & & \forall C'' \in \mathcal{C}_K : C \xrightarrow{*} C'' \xrightarrow{+} C' \Longrightarrow \pi, C'' \models P
\end{array}
$$

Der Prozess $\pi = (K, \phi)$ erfüllt P, wenn P im initialen Schnitt $^\circ K$ gilt:

$$\pi \models P \iff \pi, {}^\circ K \models P$$

Ein Netz N erfüllt eine Aussage, wenn diese in all seinen Prozessen gilt.

$$N \models P \iff \forall \pi \in Proc(N) : \pi \models P$$

Analog zur Interpretation von LTL_{po} auf Prozessen kann auch die Logik CTL auf partiellen Ordnungen interpretiert werden. Dazu betrachtet man an Stelle der Menge aller Prozesse das Prozessentfaltungsnetz, das – analog zum Abwicklungsbaum für sequentielle Ordnungen – alle Verzweigungsmöglichkeiten enthält (siehe dazu Esparza, 1994).

Wir bezeichnen die Menge aller Prozesse π eines Netzes N, die eine Eigenschaft ψ erfüllen, mit:

$$Proc(N, \psi) = \{\pi \in Proc(N) \mid \pi \models \psi\} \tag{9.16}$$

Analoge Notationen verwenden wir für Dienste D und Rollenkomponenten $N[R]$ bzw. $D[R]$. Die Menge aller Prozesse, die ψ erfüllen und in eine terminale Markierung führen, ist $WFProc(D)$.

Wenn wir speziell die Prozesse von Rollenkomponenten $D[R]$ betrachten, so erhalten wir als Verallgemeinerung von Theorem 9.30 das folgende Kompositionstheorem.

Theorem 9.45 *Sei $R_1, R_2 \in \mathcal{R}$ mit $R_1 \cap R_2 = \emptyset$.*

$$Proc(D[R_1], \psi_1) \cap Proc(D[R_2], \psi_2) = Proc(D[R_1] \| D[R_2], \psi_1 \wedge \psi_2)$$

Beweis: Sei $K \in Proc(D[R_1], \psi_1) \cap Proc(D[R_2], \psi_2)$, dann gilt $K \models \psi_1$ und $K \models \psi_2$ und damit auch $K \models (\psi_1 \wedge \psi_2)$. Da $Proc(\Gamma, \psi) \subseteq Proc(\Gamma)$ gilt, folgt $K \in Proc(D[R_i])$ für $i = 1, 2$ und mit Theorem 9.30 auch $K \in Proc(D[R_1] \| R[R_2])$. Insgesamt also $K \in Proc(D[R_1] \| R[R_2], \psi_1 \wedge \psi_2)$.

Sei $K \in Proc(D[R_1] \| D[R_2], \psi_1 \wedge \psi_2)$, dann gilt $K \models (\psi_1 \wedge \psi_2)$ und damit $K \models \psi_1$ und $K \models \psi_2$. Wenn $K \in Proc(D[R_1] \| D[R_2], \psi_1 \wedge \psi_2)$, dann auch $K \in Proc(D[R_1] \| D[R_2]$ und mit Theorem 9.30 auch $K \in Proc(D[R_1]) \cap Proc(R[R_2])$. Insgesamt also $K \in Proc(D[R_i], \psi_i)$ für $i = 1, 2$. q.e.d.

9.4.3 Gesteuerte Dienste

Wir sind nun daran interessiert, ob ein Dienst korrekt bleibt, wenn wir sein Verhalten relativ zu einer Eigenschaft ψ betrachten. Wenn D ein Dienst ist und ψ eine Formel, so bezeichnen wir mit $(D \times \psi)$ den durch ψ gesteuerten Dienst.

Schränken wir die Erreichbarkeitsmenge $RS(D, M_0)$ eines Dienstnetz D auf solche Zustände M ein, die $\psi \in \mathrm{CTL}^*(X)$ erfüllen, so erhalten wir die Menge $RS(D \times \psi, M_0) := \bigcup_{i \in \mathbb{N}} RS_i(D \times \psi, M_0)$ mit:

$$\begin{aligned} RS_{k+1}(D \times \psi, M_0) &:= \{M' \mid \exists M \in RS_k(D \times \psi, M_0) : M \xrightarrow{t,\alpha} M' \wedge M' \models \psi\} \\ RS_0(D \times \psi, M_0) &:= \begin{cases} \{M_0\}, & \text{falls } M_0 \models \psi \\ \emptyset, & \text{sonst} \end{cases} \end{aligned}$$

Die Menge $RS(D \times \psi, M_0)$ ist also genau dann leer, wenn M_0 die Eigenschaft ψ nicht besitzt.

Wir schränken den Erreichbarkeitsgraph $RG(D, M_0)$ eines Dienstnetz D auf solche Zustände M ein, die ψ erfüllen, indem wir die Knoten von $RG(D, M_0)$ auf $RS(D \times \psi, M_0)$ einschränken.

Die Korrektheit eines gesteuerten Dienstnetz $D \times \psi$ wird analog zu der des Dienstes D formuliert (vgl. Definition 9.17), nur dass jeweil $RS(D, M_0)$ durch $RS(D \times \psi, M_0)$ ersetzt werden muss.

Definition 9.46 *Wenn D ein Dienst ist und $\psi \in \mathrm{CTL}^*(X)$ eine Formel, so bezeichnen wir mit $(D \times \psi)$ den durch ψ gesteuerten Dienst. Ein gesteuertes Dienstnetz $(D \times \psi)$ heißt* korrekt*, wenn gilt:*

$$\begin{aligned} &\forall M \in RS(D \times \psi, M_0) : \pi(M) \geq m_f \Longrightarrow \pi(M) = m_f \\ &\wedge \forall M \in RS(D \times \psi, M_0) : \exists M' \in RS(D \times \psi, M) : \pi(M') = m_f \\ &\wedge \forall t \in T : \exists M_0 : f(M_0) = m_0 \wedge \exists M \in RS(D \times \psi, M_0) : M \xrightarrow{t} \end{aligned}$$

Ein gesteuertes Dienstnetz $(D \times \psi)$ *heißt* schwach korrekt*, wenn nur die ersten beiden Bedingungen gelten*

Ein gesteuerte Dienstnetz $D \times \psi$ *heißt* strukturell (schwach) korrekt*, wenn es für alle Anfangsmarkierungen* M *mit* $\pi(M) = m_0$ *(schwach) korrekt ist.*

Theorem 9.47 *Sei* D *ein Dienst, der in* M_0 *terminieren kann, d.h.* $\exists M \in RS(D, M_0) : \pi(M) = m_f$*, dann existiert eine Steuerung* ψ*, so dass* $D \times \psi$ *schwach korrekt ist.*

Beweis: D kann terminieren. Also existiert eine Schaltfolge $M_0 \xrightarrow{t_1,\alpha_1} M_1 \xrightarrow{t_2,\alpha_2} \cdots M_n = M$ mit $\pi(M) = m_f$. Wählen wir speziell

$$\psi = \bigwedge_{k=0}^{n} \circ^k (M = M_k) = \Big((M = M_0) \wedge \circ (M = M_1) \wedge \circ\circ (M = M_2) \wedge \cdots \Big),$$

so erlaubt die Steuerung nur diese Schaltfolge, was zeigt, dass der Dienst $D \times \psi$ korrekt ist. q.e.d.

9.5 Dienstklassen

Dienstklassen sind Mengen von Dienstnetzen, die konsistent bezüglich der verwendeten Rollen sind. Formulieren wir im folgenden Konsistenz. Die Rollen der Dienstnetze einer Dienstklasse sind nicht notwendigerweise disjunkt. Es ist möglich, dass die gleiche Rolle r in zwei Dienstnetzen D_1 und D_2 vorkommt. In diesem Fall fordern wir aber, dass die Rolle in beiden Netzen identische Prozesse beschreiben:

$$D_1[R] \simeq D_2[R]$$

Dadurch wird ausgedrückt, dass Interaktion und Rollen zwei untrennbare Konzepte sind, d.h. dass unter einer abstrakten Betrachtungsweise die Interaktion mit dem Verhältnis der an ihr beteiligten Rollen gleichzusetzen ist.

Zu einer Menge an Diensten $\mathcal{D}$ bezeichnet $\mathcal{D}(R)$ die Menge aller Dienste, die die Rolle $R \in \mathcal{R}$ enthalten:

$$\mathcal{D}(R) = \{D \in \mathcal{D} \mid R(D) \supseteq R\} \tag{9.17}$$

Eine Dienstklasse soll abgeschlossen gegenüber der Substitution verhaltensgleicher Komponenten sein, d.h. für zwei Dienste $D, D' \in \mathcal{D}$ mit der Verhaltensäquivalenz $D[R] \simeq D'[R']$ ist auch stets die Komposition $D[R] \| D'[R(D') \setminus R']$ und auch $D'[R'] \| D[R(D) \setminus R]$ auch in $\mathcal{D}$.

Definition 9.48 *Sei* $\mathcal{R}$ *eine Rollenstruktur. Eine* Dienstklasse $\mathcal{D}$ *besteht aus einer gegenüber der Substitution verhaltensgleicher Komponenten abgeschlossener Menge an Dienstnetzen* $\mathcal{D}$ *mit*

$$\forall R \in \mathcal{R} : \forall D_1, D_2 \in \mathcal{D}(R) : D_1[R] \simeq D_2[R]$$

Bemerkung: Es reicht aus, für Dienstklassen die Äquivalenz $D_1[R] \simeq D_2[R]$ für elementare Rollen $R = \{r\}$ zu fordern, da alle anderen Rollen durch Vereinigung gebildet werden können.

Für jede Dienstklasse $\mathcal{D}$ generiert jede Rolle R die Klasse $\mathcal{D}(R)$, deren Elemente $D \in \mathcal{D}(R)$ sich nicht in ihrem Verhaltem bezüglich der Rolle R unterscheiden lassen.

Für eine Dienstklasse $\mathcal{D}$ definieren wir die Menge aller Dienstkomponentenprozesse:

$$Proc(\mathcal{D}, \mathcal{R}) := \bigcup_{D \in \mathcal{D}} \bigcup_{R \in \mathcal{R}} Proc(D[R]) \tag{9.18}$$

Die Unterklasse der terminierenden Prozesse ist:

$$WFProc(\mathcal{D}, \mathcal{R}) := \{(K, \phi) \in Proc(\mathcal{D}, \mathcal{R}) \mid \pi(\phi(K^\circ)) = m_f\} \tag{9.19}$$

Wir definieren im folgenden die Menge der Formeln für eine Dienstklasse $\mathcal{D}$. Sei $D \in \mathcal{D}$ ein Dienstnetz. Die Atome sind von der Form $A_{k,q}$, wobei $k \in \mathbb{Q}^{|P_{KK}(D)|}$ und $q \in \mathbb{Q}$ ist, oder von der Form $A_{p,c,n}$, wobei $p \in P_{KK}(D)$, $c \in [\![d(p)]\!]$ und $n \in \mathbb{N}$ ist. Die Menge aller dieser Atome von D wird mit $\mathcal{A}_D$ bezeichnet. Die Menge aller Atome ist $\mathcal{A}_\mathcal{D} = \bigcup_{D \in \mathcal{D}} \mathcal{A}_D$.

Zu einer Markierung M ergibt sich die Bewertungsfunktion α als die Familie der α_D, die jeweils folgendermaßen definiert sind:

$$\begin{aligned} \alpha_D(M) \quad = \quad & \{A_{k,c} \mid \textstyle\sum_{p \in P_{KK}(D)} (k(p) \cdot \pi(M)(p)) \leq c\} \cup \\ & \{A_{p,c,n} \mid M(p)(c) \leq n\} \end{aligned}$$

Zu einem Prozess $\pi \in Proc(D)$ erweitert sich dies zu einer Bewertung auf den Schnitten:

$$\alpha_{D,\pi}(C) = \alpha_D(\phi(C))$$

Damit ist dann $PM(\mathcal{D}) = (\bigcup_{D \in \mathcal{D}} Proc(D), \alpha)$ das von D erzeugte Standardprozessmodell der Logik $\mathrm{LTL}_{po}(\mathcal{A}_\mathcal{D})$.

Um sowohl die Steuerung mittels des Erreichbarkeitgraphen als auch die Erfüllbarkeit im Prozessmodell betrachten zu können, schränken wir die folgenden Betrachtungen auf Formeln ein, die sowohl in $\mathrm{LTL}(X)$ als auch $\mathrm{LTL}_{po}(X)$ sind.

Definition 9.49 *Sei $\mathcal{D}$ eine Dienstklasse. Die Menge der* Prozessformeln *ist definiert als die Menge:*

$$PF_\mathcal{D} := \mathrm{LTL}(\mathcal{A}_\mathcal{D}) \cap \mathrm{LTL}_{po}(\mathcal{A}_\mathcal{D}) \tag{9.20}$$

Für die Steuerung konvertieren wir jede Prozessformel ψ implizit als eine CTL*-Formel, indem wir den Pfadquantor $\mathbf{A}$ hinzufügen, d.h. wir betrachten $\mathbf{A}\ \psi$ anstelle von ψ.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Interaktion verteilter Systeme mit Hilfe von Dienstnetzen formalisiert. Dienstnetze sind gefärbte Petrinetze, die die Grundstruktur eines Ablaufnetzes besitzen und zudem mit einer Konzeptbeschreibung und einer Rollenstruktur versehen sind.

Da Dienstnetze eng mit den Workflownetzen verwandt sind, haben wir die Korrektheit von Dienstnetzen analog definiert und konnten zeigen, dass sich Korrektheit von Ablaufnetzen entscheiden lässt, indem man diese auf Workflows reduziert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Erzeugung von Rollenkomponenten. Wir konnten anhand der Rollenstruktur der Dienstnetze Rollenkomponenten definieren. Rollenkomponenten sind Subnetze von Dienstnetzen, deren Netzknoten alle der gleichen Rolle zugeordnet sind. Rollenkomponenten sind stets Netzkomponenten und erweisen sich als kompositonale Systeme, die stets miteinander wohlgeformt verknüpft werden können. Rollenkomponenten stellen den Dienst dar, der von der Rolle erbracht wird. Sie stellen implizit eine Spezifikation der Rechte und der Pflichten, die mit dieser Rolle verbunden sind, dar.

Um Dienstnetze koordinieren und steuern zu können, haben wir auch noch den Bezug zur temporalen Logik betrachtet. Dies sowohl für sequentielle als auch für partiell geordnete Modelle.

Im folgenden betrachten wir nun, wie die Agenten in Teams aggregiert werden, um die Dienstnetze „mit verteilten Rollen“ auszuführen.

10 Koordinierung in Agententeams

In Multiagentensystemen finden sich Strukturen, die nicht einzelnen Agenten zuzuordnen sind, sondern ausschließlich der Interaktion zwischen ihnen dienen, beispielsweise Koordinationsstrukturen. In diesem Kapitel verschieben wir, aufbauend auf (Köhler, 2007), den Betrachtungswinkel vom Agenten weg – hin zu einer ganzheitlichen Perspektive, in der wir die Interaktionen zwischen den Agenten in den Mittelpunkt stellen. Es geht uns darum, Strukturen zu schaffen, in denen sich koordiniertes Handeln vollziehen kann, ähnlich dem *Contract-Net Protocol* (Smith, 1977) oder dem *Partial Global Planning Protocol* (Durfee und Lesser, 1991), also allgemein: Teamwork-Strukturen (Cohen und Levesque, 1991; Castelfranchi, 1995; Jennings, 1996; Ossowski, 1999; Castelfranchi, 2000).

Betrachten wir beispielshaft eine Produzenten/Konsumenten Beziehung (engl. producer/consumer scenario). Diese Beziehung wird in einem Markt hergestellt. Die Tätigkeit des Handelns involviert zwei Rollen, nämlich die des Produzenten (*producer*) und die des Konsumenten (*consumer*). Im Markt befinden sich m Agenten $A_1, \ldots, A_m$, die alle gleichermaßen in der Lage sind, als Produzent tätig zu werden. Daneben existieren n Agenten $B_1, \ldots, B_n$, die die Rolle des Konsumenten einnehmen können.

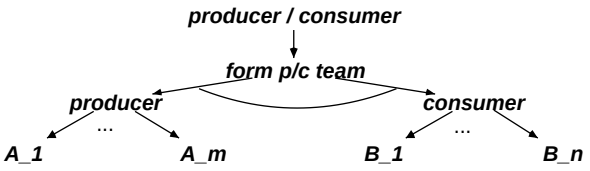


Abbildung 10.1: Producer/Consumer Szenario

Von Interesse ist, wie sich Produzenten und Konsumenten im Markt finden, d.h. wie sich Handelsbeziehungen in der Gestalt von Teamstrukturen formieren. Abbildung 10.1 formalisiert die Beziehungen zwischen den Agenten, den Rollen und der Tätigkeit als AND/OR-Graph: Die Rollen der Tätigkeit sind durch eine konjunktive Kante verbunden, da beide Rollen gleichzeitig benötigt werden. Dagegen sind die Agenten disjunktiv mit den Rollen assoziiert, da jeder Agent eine mögliche Instantiierung darstellt.

Abbildung 10.1 stellt eine statische Sichtweise auf das System dar. Teamformation ist jedoch ein dynamischer Prozess, bei dem sich die Agenten zu einem Team gruppieren. Um diese Dynamik auszudrücken, modellieren wir das Szenario als Petrinetz, dargestellt in Abb. 10.2. Das Netz, das die Teamformation modelliert, besitzt dabei eine Grundstruktur, die dem AND/OR-Graphen stark ähnelt. Jeder Agent kann die mit ihm assoziierte Transition schalten, um sich für die Rolle zu bewerben. Ist zu jeder Rolle mindestens eine Bewerbung vor-

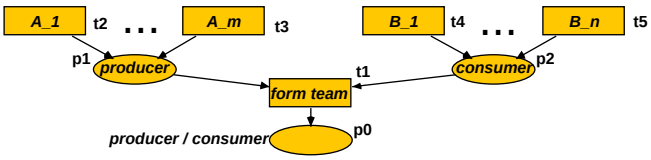


Abbildung 10.2: Formation des Producer/Consumer-Teams

handen, kann die Transition form team schalten, wodurch die beiden Marken abgezogen werden und eine neue Marke auf der Stelle producer/consumer generiert wird, die das Team darstellt. Man beachte, dass das Modell mit $m+n+4$ Netzknoten bereits $m \cdot n$ Schaltprozesse besitzt, die jeweils den $m \cdot n$ möglichen Produzent/Konsument Paarungen entsprechen. Das Modell leistet also bereits eine kompaktere Darstellung des Sachverhalts.

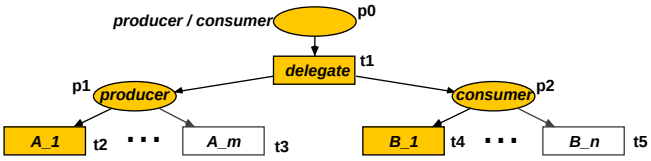


Abbildung 10.3: Bearbeitung des Producer/Consumer-Teams

Das Netz aus Abb. 10.2 zeigt die Sicht der Teamformation. Wir können diesen Prozess genauso aus der Perspektive der Aufgabenbearbeitung betrachten. Die Aufgabe ist es, eine Produzenten/Konsumenten-Beziehung mit Hilfe der im Markt vorhanden Agenten zu realisieren. Dieses Szenario ist in Abb. 10.3 modelliert. Eine Marke auf der producer/consumer aktiviert die Transition delegate (der Korrespondenz zur Transition form team), die die beiden Rollen aktiviert, die wiederum durch Agenten ausgefüllt werden. Eine Bearbeitungsstruktur wie in Abb. 10.3 ist als unter der Bezeichnung TMST-Baum (engl. task/method/subtask tree) in der Literatur bekannt (siehe dazu Cuena und Ossowski, 1999). Der durch die Pfeilrichtung festgelegte Markenfluss beschreibt hierbei die Delegationsbeziehungen. Dies ist nicht mit den Kommunikationsbeziehungen zu verwechseln, denn im allgemeinen kommunizieren alle Rolleninhaber im Nachbereich einer Tätigkeit miteinander. Im Beispiel interagieren also der Produzent und der Konsument – und dies, obwohl sie im gerichteten Graphen nicht durch direkte oder indirekte Delegationsbeziehungen verbunden sind.

Auch dieses Modell ähnelt dem AND/OR-Graphen. Auch die beiden Netzmodelle sind miteinander verwandt: Offensichtlich ist Abb. 10.3 das reverse Netz von Abb. 10.2, d.h. es wurde lediglich die Richtung der Kanten umgekehrt. Das Verhalten der beiden Netze ist trotz ihrer Ähnlichkeiten sehr verschieden, da wir von unterschedlichen Startmarkierungen ausgehen.

Es sollte klar geworden sein, dass die beiden Modelle verwandte Prozesse beschrieben: Die beiden Perspektiven modellieren den gleichen Sachverhalt aus unterschiedlichem Blickwinkel, nämlich zum einen aus dem Blickwinkel der Agen-

ten und zum anderen aus dem der Delegations- und Interaktionsbeziehung.[1] Welchem Blickwinkel wir hier den Vorzug geben ist Geschmackssache. Wir entscheiden uns hier für die Perspektive der Delegationsbeziehung wie sie in Abbildung 10.3 modelliert wurde.

10.1 Aufgabenbearbeitung in Delegationsnetzen

Ein Team lässt sich als ein spezielles Petrinetz (P, T, F) definieren, das wir im folgenden als Delegationsnetz bezeichnen. Teams bearbeiten Aufagen durch Delegation von Teilaufgaben. Jede Aufgabe ist mit einer Rolle identifiziert. Jede *Aufgabe*, wird durch eine Stelle modelliert, jede *Delegation* durch eine Transition. Die Semantik der Kanten ist für (p,t)- und (t,p)-Kanten unterschiedlich: Die Profile $t^\bullet$ im Nachbereich einer Transition t sind genau diejenigen, die t zur Ausführung benötigt (konjunktive Verknüpfung). Jede Transition $t \in p^\bullet$ im Nachbereich von p beschreibt alternative Wahlmöglichkeiten von Tätigkeiten, die zur Bearbeitung der Teilaufgaben genutzt werden können (disjunktive Verknüpfung).

Da wir die Delegationsperspektive auf Teams gewählt haben, wird jede Tätigkeit durch genau eine Aufgabe angestoßen, wodurch wir fordern können, dass jede Transition t höchstens eine Stelle im Vorbereich besitzt. Es ist zudem wünschenswert, dass der Vorbereich von t nicht leer ist, damit Aufgaben nicht ohne Anlaß generiert werden. Insgesamt ergibt sich dann $\forall t \in T : |{}^\bullet t| = 1$. Die dann eindeutig bestimmte Stelle p im Vorbereich von t bezeichnen wir mit $p(t)$. Außerdem muss $p^\bullet \neq \emptyset$ gelten, damit jede Aufgabe überhaupt bearbeitbar ist.

Definition 10.1 *Ein* Delegationsnetz *ist ein Petrinetz* $N = (P, T, F)$*, das* $p^\bullet \neq \emptyset$ *für alle* $p \in P$ *und* $|{}^\bullet t| = 1$ *für alle* $t \in T$ *erfüllt.*

Eine Transition mit $t^\bullet \neq \emptyset$ heißt *delegativ*, eine Transition mit $t^\bullet = \emptyset$ heißt *ausführend*.

Sei $N = (P, T, F)$ ein Delegationsnetz. *Tätigkeitspfade* sind Schaltfolgen $w \in T^+$, die das Netz von einer Markierung m in die leere Markierung $\mathbf{0}$ überführen. In dieser Markierung sind alle Teilaufgaben Diensten zugeordnet worden, so dass keinerlei unzugewiesene Aufträge (sprich: Marken) mehr existieren. Für das Netz aus Abbildung 10.4 in der Markierung $m = p_0$ sind dies die Schaltfolgen (modulo Permutation nebenläufiger Ereignisse):

$$t_1t_2t_8t_9t_6, \quad t_1t_2t_8t_9t_3, \quad t_1t_2t_8t_9t_4 \quad \text{und} \quad t_1t_2t_8t_9t_5t_7t_{10}t_{11}$$

[1] Es sei auch noch angemerkt, dass die Interpretation der Transitionen der beiden Ansätzen unterschiedlich ist: Die Formationssicht aus Abb. 10.2 betont, dass Agenten als aktive Einheiten (modelliert als Transitionen) mit Hilfe von Nachrichtenkanälen, (modelliert als Stellen), miteinander kommunizieren. Dagegen beschreibt die Bearbeitungssicht in Abb. 10.3, dass Aufgaben (modelliert als Stellen) durch Aktivitäten (modelliert als Transitionen) aufgeteilt und delegiert werden.

Schon Petri unterscheidet diese beiden Typen von Systemen: Netze des erste Typs nennt er *organization nets*. „Here, the transitions denote offices and the states denote channels, capable of holding messages (such as commands) until they are taken away (obeyed) by a subordinate office." (Petri und Reisig, 2008) Netze des zweiten Typs nennt er *production nets*: „The activities of transitions are accordingly subdivided in give and take." (Petri und Reisig, 2008)

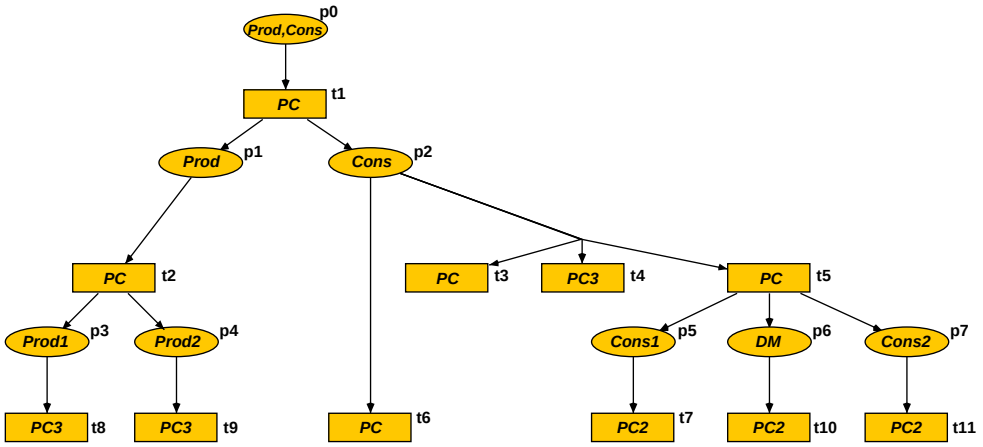


Abbildung 10.4: Ein Delegationsnetz

Die Menge der Tätigkeitspfade aus einer Markierung m ist:

$$TP(m) := \{w \in T^* \mid m \xrightarrow{w} \mathbf{0}\} \tag{10.1}$$

Wir fragen uns, ob jede Markierung eines R/D-Netzes, die von in der einer initialen erreichbar ist, in die leere Markierung überführt werden kann.

Definition 10.2 *Sei $N = (P, T, F)$ ein P/T-Netz.*

- *Die Markierung m heißt* bearbeitbar*, wenn $\mathbf{0} \in RS(m)$ gilt.*
- *Das Netz N heißt* bearbeitbar*, wenn alle Markierungen m dies sind.*
- *Die Markierung m heißt* sicher bearbeitbar*, wenn für alle $m' \in RS(m)$ auch $\mathbf{0} \in RS(m')$ gilt.*
- *Das Netz N heißt* sicher bearbeitbar*, wenn alle Markierung dies sind.*

Für beliebige Netze ist es sehr aufwendig, die Bearbeitbarkeit zu entscheiden, da das in der Definition befindliche das Erreichbarkeitsproblem im allgemeinen mindestens exponentiell viel Platz benötigt. Es wird sich aber im folgenden zeigen, das wir die Struktureigenschaften der Delegationsnetze nutzen können, um das Problem effizient zu entscheiden. Betrachten wir zunächst die Eigenschaften, die sich aus der Netzstruktur der Delegationsnetze ergeben.

10.1.1 Linearität von Erreichbarkeitsmengen

Wir betrachten die Linearitätseigenschaft von Delegationsnetzen. Wir erweitern die Multimengenaddition + auf Mengen von Multimengen durch:

$$A + B := \{m_1 + m_2 \mid m_1 \in A \wedge m_2 \in B\}$$

Theorem 10.3 *Sei N ein Delegationsnetz, dann gilt:*

$$RS(m_1 + m_2) = RS(m_1) + RS(m_2)$$

Beweis: Die Inklusion $RS(m_1+m_2) \supseteq RS(m_1)+RS(m_2)$ folgt aus der Monotonieeigenschaft der Petrinetze.

Nehmen wir an, es gäbe eine Markierung $m \in RS(m_1+m_2)$, für die $m \notin RS(m_1)+RS(m_2)$ gilt. Dann gäbe es eine Markierung $m' = m'_1 + m'_2$ mit $m'_i = m'_1 \in RS(m_i)$ mit $i = 1, 2$, die eine Transition t aktiviert, die weder in m'_1 noch in m'_2 aktiviert ist, denn gäbe es kein solches m', dann könnte auch kein m erreicht werden. Wegen der Bedingung $|{}^\bullet t| = 1$ kann es für Delegationsnetze eine solche Transition nicht geben. Also gilt $RS(m_1+m_2) \subseteq RS(m_1)+RS(m_2)$. q.e.d.

Die erreichbaren Markierungen $RS(\sum_{i=1}^{n} p_i)$ sind daher bereits durch die elementaren Mengen $RS(\{p_i\})$ charakterisiert. Analog ergibt sich eine Linearität für die Schaltfolgen. Für zwei Sprachen $L_1 \subseteq X^*$ und $L_2 \subseteq Y^*$ ist die Mischsprache (Shuffle-Sprache) folgendermaßen definiert:

$$L_1 \sqcup\!\sqcup\ L_2 := \{u_1 v_1 \cdots u_n v_n \mid u_1 \cdots u_n \in L_1, u_i \in X^*, v_1 \cdots v_n \in L_2, v_i \in Y^*\}$$

Theorem 10.4 *Sei N ein Delegationsnetz, dann gilt:*

$$FS(m_1+m_2) = FS(m_1) \sqcup\!\sqcup\ FS(m_2)$$

Beweis: Jede Schaltfolge von m_1 kann beliebig mit denen von m_2 gemischt werden, um eine Schaltfolge von m_1+m_2 zu erhalten, denn wegen $|{}^\bullet t| = 1$ aktiviert eine Markierungssumme m_1+m_2 keine Transitionen, die nicht bereits in m_1 oder in m_2 aktiviert gewesen sind.

Umgekehrt lässt sich jede Schaltfolge von m_1+m_2 zerlegen, da jede Marke unabhängig von den anderen bearbeitet wird. q.e.d.

10.1.2 Kontextfreiheit der Tätigkeitspfade

Es erscheint naheliegend, die Schaltfolgen eines Delegationsnetzes $N = (P, T, F)$ durch eine kontextfreie Grammatik zu beschreiben. Die Stellen $p \in P$ sind die Nonterminale (Variablen):

$$V_G = \{A_p \mid p \in P\}$$

Die Transitionen $t \in T$ sind die Terminale:

$$T_G = \{a_t \mid t \in T\}$$

Sei $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$. Jeder Markierung m wird das folgende Wort zugeordnet:

$$\alpha(m) = A_{p_1}^{m(p_1)} \cdots A_{p_n}^{m(p_n)} \tag{10.2}$$

Jeder Transition t mit $t^\bullet = \{p_1, \ldots, p_n\}$ werden die $n+1$ Produktionen zugewiesen:

$$A_{p(t)} \to a_t A_{p_1} \cdots A_{p_n} \mid A_{p_1} a_t A_{p_2} \cdots A_{p_n} \mid \ldots \mid A_{p_1} \cdots a_t A_{p_n} \mid A_{p_1} \cdots A_{p_n} a_t$$

Hierbei ist $p(t)$ die eindeutig bestimmte Stelle im Vorbereich von t. Die Startproduktion ist $S \to \alpha(m)$. Die so definierte Grammatik $G(N, m)$ ist offensichtlich in Greibach Normalform.

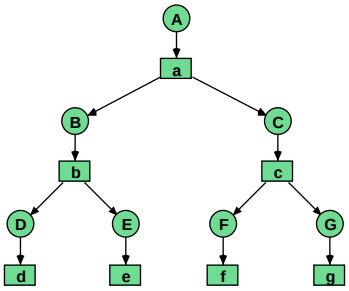


Abbildung 10.5: Ein Delegationsnetz

Mit der so definierten Grammatik $G(N, m)$ erhalten wir aber nur eine Approximation an die Menge der Schaltfolgen, denn die Transitionen gleicher Schalttiefe werden nach Teilbäumen sortiert. So ist für das Delegationsnetz in Abbildung 10.5 die Schaltfolge $w = abdcefg$ möglich, d.h. $w \in FS(N)$. Dieses w ist aber nicht ableitbar:

$$S \Longrightarrow aBC \Longrightarrow abDEC \Longrightarrow abDEcFG$$

Man erkennt, dass in w die Transition c zwischen das d und das e geraten ist, was die Grammatik, die immer jeden Teilbäume komplett entwickelt, nicht leisten kann. Nach der Wahl der Produktion $S \to aBC$ kann kein von B entwickeltes Symbol mehr nach einem von C entwickelten erzeugt werden.

Im allgemeinen gilt also nur $L(G(N, m)) \subseteq FS(N)$. Die Schaltfolgen dieser Bäume sind als *Szillard-Sprachen* bekannt (vgl. Salomaa, 1987). Für unsere Zwecke ist dies aber keine gravierende Einschränkung, denn zu jeder Schaltfolge, die von $G(N, m)$ nicht erzeugt werden kann, existiert ein Schaltwort in $L(G)$, das sich nur bzgl. der Vertauschung nebenläufiger Ereignisse unterscheiden. Dies gilt sogar, wenn wir die Menge der Regeln auf einen Produktionstyp einschränken, bei dem wir die Transition an den Anfang setzen:

$$A_{p(t)} \to a_t A_{p_1} \cdots A_{p_n}$$

Definition 10.5 *Sei $N = (P, T, F)$ ein Delegationsnetz. Dann ist die kontextfreie Grammatik $G(N, m) = (T_G, V_G, R_G, S)$ definiert als:*

1. *Die Menge der Terminale ist $T_G = \{a_t \mid t \in T\}$.*
2. *Die Menge der Variablen ist $V_G = \{A_p \mid p \in P\} \uplus \{S\}$.*
3. *Die Menge der Regeln ist gegeben als*

   $$R_G = \{S \to \alpha(m)\} \cup \{A_{p(t)} \to a_t A_{p_1} \cdots A_{p_n} \mid t \in T \wedge t^\bullet = \{p_1, \ldots, p_n\}\}.$$

4. *Das Startsymbol ist S.*

Erreichbare Nonterminale $A \in V$ einer kontextfreien Grammatik $G = (T, V, R, S)$ sind solche, die sich von dem Startsymbol ableiten lassen: $S \overset{*}{\Longrightarrow} \alpha A \beta$

mit $\alpha, \beta \in (X \cup V)^*$. Die Menge der erreichbaren Nonterminale (engl. reachable variables)

$$RV(G) = \{A \in V \mid \exists \alpha, \beta \in (X \cup V)^* : S \stackrel{*}{\Longrightarrow} \alpha A \beta\}$$

lassen sich schrittweise berechnen. Definiere dazu:

$$\begin{aligned} RV_0(G) &= \{S\} \\ RV_{n+1}(G) &= RV_n(G) \cup \{B \in V \mid \exists (A \to \alpha B \beta) \in P : A \in RV_n(G)\} \end{aligned}$$

Produktive Nonterminale $A \in V$ einer kontextfreien Grammatik $G = (T, V, R, S)$ sind solche, von denen sich eine Terminalwort $w \in T^*$ ableiten lässt: $A \stackrel{*}{\Longrightarrow} w$. Die Menge der produktiven Nonterminale (engl. productive variables)

$$PV(G) = \{A \in V \mid A \stackrel{*}{\Longrightarrow} w \wedge w \in T^*\}$$

lassen sich schrittweise berechnen. Definiere dazu:

$$\begin{aligned} PV_0(G) &= T \\ PV_{n+1}(G) &= PV_n(G) \cup \{A \in V \mid \exists (A \to w) \in P : w \in PV_n(G)^*\} \end{aligned}$$

Die Mengen $PV_1(G), PV_2(G), \ldots$ sind monoton wachsend (bzgl. der Mengeninklusion) und durch die endliche Menge V nach oben beschränkt, so dass $PV_{k+1}(G) = PV_k(G)$ für einen Index $k \leq |V|$ gilt. Für diesen Index gilt dann $PV_k(G) = PV(G)$. Analog für $RV(G)$.

Theorem 10.6 *Sei $N = (P, T, F)$ ein Delegationsnetz.*

1. *Die Markierung m ist genau dann bearbeitbar, wenn alle Nonterminale A_p der kontextfreien Grammatik $G(N, m)$ mit $m(p) > 0$ produktiv sind.*

2. *Die Markierung m ist genau dann sicher bearbeitbar, wenn alle erreichbaren Variablen A_p der kontextfreien Grammatik $G(N, m)$ mit $m(p) > 0$ produktiv sind.*

Beweis:

1. Wenn ein Nonterminal $A_p \in N_G$ produktiv ist, dann gilt $A_p \stackrel{*}{\Longrightarrow} w'$ Da $S \to \alpha(m)$ gilt und $\alpha(m)$ alle A_p mit $m(p) > 0$ enthält, haben wir $S \stackrel{*}{\Longrightarrow} w$ mit $w = a_{t_{i_1}} \cdots a_{t_{i_n}} \in T_G^*$. Nach Konstruktion von $G(N, m)$ ist $T_G = \{a_t \mid t \in T\}$. Da die Produktionen der Grammatik dem Schaltverhalten entsprechen, ist $t_{i_1} \cdots t_{i_n}$ ein Tätigkeitspfad. Also ist $\mathbf{0}$ von m in N erreichbar.

   Ist umgekehrt $\mathbf{0}$ erreichbar, dann gibt es eine Schaltfolge $w \in T^*$ mit $m \xrightarrow{w} \mathbf{0}$. Also gilt $S \Longrightarrow \alpha(m) \stackrel{*}{\Longrightarrow} w$ und damit gibt es eine Ableitung von A_p, in der alle Nonterminale, die ja den Stellen entsprechen, verschwinden, d.h. die A_p sind produktiv.

2. Ist m' erreichbar von m und $\mathbf{0}$ von m', dann gilt $S \Longrightarrow \alpha(m) \stackrel{*}{\Longrightarrow} \alpha(m')$. Dies gilt genau dann, wenn alle A_p with $p \in \{p \mid m'(p) > 0\}$ produktiv sind und alle A_{p_i} mit $\alpha(m') = A_{p_1}^{m'(p_1)} \cdots A_{p_n}^{m'(p_n)}$ erreichbare Variablen in $G(N, m)$ sind.

q.e.d.

Beschränktheit entspricht den Zyklen im Netz, bzw. den Zyklen der Grammatik. Ein Variable A kann sich selbst generieren, wenn $\alpha, \beta \in (X \cup V)^*$ existieren, so dass $A \stackrel{*}{\Longrightarrow} \alpha A \beta$ gilt. Gilt $|\alpha\beta| > 0$, dann generiert sich A ansteigend.

Lemma 10.7 *Ein Delegationsnetz (N, m_0) ist genau dann unbeschränkt, wenn in $G(N, m_0)$ eine erreichbare Variable A existiert, die sich selbst ansteigend generieren kann.*

Beweis: Ein Netz ist genau dann unbeschränkt, wenn es überdeckende Schaltfolge hat:

$$m_0 \stackrel{*}{\rightarrow} m_1 \stackrel{*}{\rightarrow} m_2 \quad \text{und} \quad m_1 < m_2$$

Dies ist für Delegationsnetze genau dann der Fall, wenn in $G(N, m_0)$ auch $S \stackrel{*}{\Longrightarrow} \alpha_1 A \alpha_2$ und $A \stackrel{*}{\Longrightarrow} \beta_1 A \beta_2$. Außerdem muss $m_1 < m_2$ und damit auch $|\beta_1\beta_2| > 0$ glten. Also ist A eine erreichbare Variable ist, die sich selbst ansteigend generieren kann. q.e.d.

10.2 Rollen/Dienst-Netze und Teams

Wir erweitern nun Delegatiosnetze um Anschriften, die die Rollen und Dienste näher charakterisieren. Diese Netze bezeichnen wir als Rollen/Dienst-Netze (kurz: R/D-Netze). Für R/D-Netze wird jedem $p \in P$ durch $R : P \rightarrow \mathcal{R}$ seine Rolle zugewiesen (vgl. Def. 9.11). Außerdem wird jedem $t \in T$ durch $D : T \rightarrow \mathcal{D}$ sein Dienstnetz zugewiesen, wobei $\mathcal{D}$ eine Dienstklasse sein muss (vgl. Def. 9.48).

Jede Stelle $p \in P$ besitzt in R/D-Netzen mindestens eine Stelle im Nachbereich. Das Diensnetz $D(t)$ beschreibt nun für jedes $t \in p^\bullet$ einen Dienst, der die Rolle $R(p)$ implementiert.

Die Stellen im Nachbereich von t bezeichnen dagegen delegierte Aufgaben. Die Rollen $R(p)$ der Stellen $p \in t^\bullet$ sollen dabei eine disjunkte Aufteilung der Arbeit beschreiben (s.u.).

Teamnetze sind R/D-Netze, deren Grundstruktur ein Kausalnetz bildet, das mit einer Stelle initialisiert ist und nur mit Transitionen endet. Abbildung 10.6 zeigt ein Teamnetz.

Definition 10.8 *Ein* R/D-Netz $RD = (N, R, D)$ *besteht aus den folgenden Komponenten:*

1. $N = (P, T, F)$ *ist ein Delegationsnetz.*
2. $R : P \rightarrow \mathcal{R}$ *ist die Rollenabbildung.*
3. $D : T \rightarrow \mathcal{D}$ *ist die Dienstnetzabbildung.*

Ein R/D-Netz heißt Teamnetz, *wenn gilt:*

1. N *ist ein stark zusammenhängendes Kausalnetz.*
2. N *besitzt genau einen minimalen Knoten:* $|{}^\circ N| = 1$.

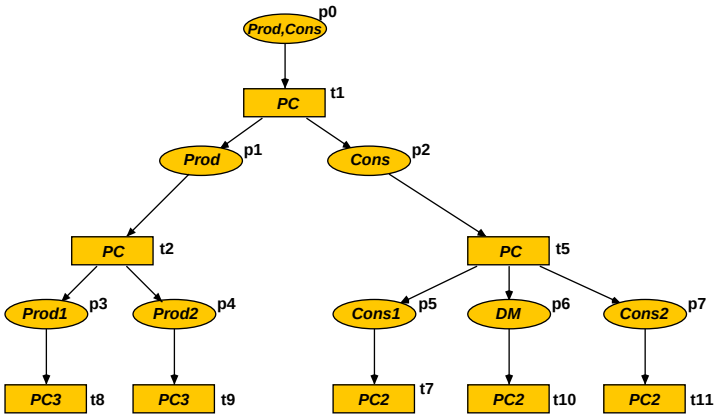


Abbildung 10.6: Ein Teamnetz

Für ein R/D-Netz $RD = (N, R, D)$ definieren wir die Menge der Stellen, die die Rolle R anstoßen können, als:

$$Start_{RD}(R) = \{p \in P \mid R(p) = R, {}^\bullet p = \emptyset\} \tag{10.3}$$

Ein Dienst D_0 kann vom R/D-Netz $RD = (N, R, D)$ *geleistet* werden, wenn es eine Stelle $p_0 \in Start_{RD}(R(D_0))$ gibt, für die eine Transition $t \in p_0{}^\bullet$ existiert, so dass $D(t) = D_0$ gilt.

Teamnetze notieren wir auch in der Form (K, R, D) mit $K = (B, E, F)$, weil dies für Kausalnetze eine übliche Darstellungsweise ist. Für ein beliebiges R/D-Netz $RD = (N, R, D)$ mit $N = (P, T, F)$ definieren wir die Abbildung $R : 2^P \to \mathcal{R}$ durch $R(P') = \bigcup\{R(p) \mid p \in P'\}$.

Lemma 10.9 *Elementare Eigenschaften von R/D-Netzen:*

1. *R/D-Netze sind Free-Choice Netze.*
2. *Für alle Teamnetze gilt $\forall p \in P : |p^\bullet| = 1$ und $\forall t \in T : |{}^\bullet t| = 1$.*
3. *Alle minimalen Knoten sind Stellen und alle maximalen Knoten sind Transitionen: ${}^\circ N \subseteq P$ und $N^\circ \subseteq T$.*
4. *Jedes Teamnetz N besitzt genau einen Platz als minimalen Knoten ${}^\circ N \subseteq P$.*
5. *Wenn p eine Stelle des Teamnetzes (N, R, D) mit $N = (P, T, F)$ ist, dann ist auch das auf $P_p = (\uparrow p \cap P)$ und $T_p = (\uparrow p \cap T)$ eingeschränkte Netz ein Teamnetz:*

$$RD_{\uparrow p} := (N_p, R_{|P_p}, D_{|T_p}) \quad mit \quad N_p = (P_p, T_p, F \cap (P_p \cup T_p)^2) \tag{10.4}$$

Für jedes $p \in P$ bezeichnen wir $RD_{\uparrow p}$ als das Subteam *von RD.*

Beweis: Zu (1): Dies gilt wegen der Bedingung $|{}^\bullet t| = 1$.

Zu (2): Teamnetze sind R/D-Netze, für die nach Definition $|p^\bullet| > 0$ gilt. Da Teamnetze Kausalnetze sind, gilt außerdem $|p^\bullet| \leq 1$. Insgesamt folgt $|p^\bullet| = 1$. Nach Definition gilt für R/D-Netze $|{}^\bullet t| = 1$.

Zu (3): Mit (2) gilt $|p^\bullet| = 1$, also können maximale Knoten keine Stellen sein. Wegen $|{}^\bullet t| = 1$ können analog minimale Knoten keine Transitionen sein.

Zu (4): N besitzt genau einen minimalen Knoten, der nach (3) eine Stelle ist.

Zu (5): N_p ist als Teilnetz wieder ein Kausalnetz mit p als der einzigen initialen Stelle. q.e.d.

Um den besonderen Stellenwert des minimalen Knoten hervorzuheben, wird ein Teamnetz (N, R, D) mit dem minimalen Platz p_0 auch als $R(p_0)$-Team bezeichnet.

10.2.1 Statische Wohlgeformtheit

Betrachten wir nun die Konsistenz eines R/D-Netzes. Diese ist nur dann gegeben, wenn Dienstnetze und Rollenprofile zur Struktur des Teams passen. Sei $\mathcal{D}$ eine Dienstklasse.

Sei t eine beliebige Transition des R/D-Netzes. Für jede Kante (p, t) soll $D(t)$ einen Dienst beschreiben, der die Rolle $R(p)$ implementiert. Alle Rollen der Profile des Vorbereichs ${}^\bullet t = \{p\}$ dazu müssen Teil des Dienstes $D(t)$ sein:

$$R({}^\bullet t) \subseteq R(D(t)), \text{ bzw. äquivalent dazu: } D(t) \in \mathcal{D}(R({}^\bullet t))$$

Die Stellen im Nachbereich von t bezeichnen dagegen delegierte Aufgaben. Die Rollen $R(p)$ der Stellen $p \in t^\bullet$ sollen dabei eine disjunkte Aufteilung der Arbeit beschreiben. Dies impliziert insbesondere, dass die Rollen $R(p)$ für alle $p \in t^\bullet$ disjunkt sein sollen (*Zerlegungseigenschaft*) und dass sie kompatibel sind, d.h. ein Dienst D_t existiert, der alle Rollen in $R(t^\bullet)$ enthält:

$$D_t \in \mathcal{D}\left(\bigcup_{p \in t^\bullet} R(p)\right) = \mathcal{D}(R(t^\bullet))$$

Der Dienst D_t soll eine Verhaltensverfeinerung des Vorbereich sein, d.h. der Komponente $D(t)[R({}^\bullet t)]$ sein. Dies gilt für alle Rollen $r \in R({}^\bullet t)$ des Dienstes $D(t)$ einzelnd: Die Rollen $R({}^\bullet t)$ werden von t aufgeteilt, indem jedem $r \in R({}^\bullet t)$ eine Teilmenge $P_r \subseteq t^\bullet$ der Stellen im Nachbereich zugeordnet werden. Genauer: Alle r generieren eine Partition auf $t^\bullet$. Die r zugeordneten Rollen des Nachbereichs $R(P_r)$ müssen zudem verhaltensäquivalent zu r sein (*Verhaltensverfeinerung*):

$$D_t[R(P_r)] \simeq D(t)[\{r\}]$$

Die konkrete Wahl eines $D_t \in \mathcal{D}(R(t^\bullet))$ ist dabei irrelevant.

Diese Forderung impliziert insbesondere, dass stets $|R({}^\bullet t)| \geq |t^\bullet|$ gelten muss, d.h. die Rollen $R({}^\bullet t)$ werden bei der Delegation stets aufgeteilt.

Definition 10.10 *Ein R/D-Netz (N, R, D) ist* wohlgeformt*, wenn für jede Transition $t \in T$ die folgenden Bedingungen erfüllt sind:*

1. *Rollenkompatibilität. Die Rollen im Vorbereich passen zum Dienst:* $R({}^\bullet t) \subseteq R(D(t))$
2. *Zerlegungseigenschaft. Wenn* $|t^\bullet| > 0$ *gilt, dann sind die Rollen* $R(p)$ *für alle* $p \in t^\bullet$ *disjunkt und* $\mathcal{D}(R(t^\bullet))$ *ist nicht leer.*
3. *Verhaltensverfeinerung. Wenn* $|t^\bullet| > 0$ *gilt, dann existiert für jedes* $D_t \in \mathcal{D}(R(t^\bullet))$ *eine Partition* $(P_r)_{r \in R({}^\bullet t)}$ *des Nachbereichs* $t^\bullet$*, so dass für alle* $r \in R({}^\bullet t)$ *die Verhaltensverfeinerung* $D_t[R(P_r)] \simeq D(t)[\{r\}]$ *gilt.*

Beachte, dass jedes Subteam $RD_{\Upsilon p}$ mit $p \in P_N$ eines wohlgeformten R/D-Netzes (N, R, D) dies auch ist.

Für den Speziallfall $D(t) = D_t$ ist die Verhaltensverfeinerung immer dann erfüllt, wenn die Rollen $R(t^\bullet)$ des Nachbereichs eine disjunkte Partition der Rollen $R({}^\bullet t)$ im Vorbereich darstellen.

Zur Rollenkompatibilität: In R/D-Netz sind Startstellen, d.h. Stellen mit leerem Vorbereich erlaubt. Eine wünschenswerte Eigenschaft solcher Stellen ist, dass ihr Rollenprofil $R(p)$ nicht nur einer Teilmenge der Rollen des Dienstnetz $D(t)$ für alle $t \in p^\bullet$ ist (wie für wohlgeformte R/D-Netze gefordert), sondern sogar damit übereinstimmt. Eine Stelle heißt *vollständig*, wenn folgendes gilt:

$$ {}^\bullet p = \emptyset \Longrightarrow \forall t \in p^\bullet : R(p) = R(D(t)) \tag{10.5} $$

Diese Forderung erscheint zunächst sinnvoll, da eine Stelle mit leerem Vorbereich den Beginn einer Aufgabenbearbeitung darstellt. Wir wollen diese Eigenschaft aber dennoch für die Wohlgeformtheit nicht fordern, da sie nur für die globale Sichtweise auf eine Organisation sinnvoll ist (vgl. dazu auch Abschnitt 11.3). Wir wollen aber auch noch Suborganisationen, d.h. Unterstukturen von Organisationen betrachten, und für diese kann die Eigenschaft im allgemeinen nicht erfüllt sein. Startstellen mit der Eigenschaft (10.5) können als der absolute Startpunkt von Aktivitäten betrachtet werden. Startstellen, die die Eigenschaft (10.5) nicht erfüllen, sind also gerade die Schnittstellen einer Suborganisation.

Beispiel Abbildung 10.4 zeigt ein Teamnetz. Die Dienstnetze und die Rollen sind im Teamnetz aus Abbildung 10.4 bereits als Anschriften enthalten. In dieser Organisation wird die Rolle „Consumer“ nicht direkt besetzt, denn p_2 ($Cons$) verweist nicht auf eine terminale Transition. Die Aufgaben p_3 ($Prod_1$) und p_4 ($Prod_2$) werden dagegen direkt implementiert.

Wir betrachten eine Organisation mit den Diensten PC, PC_2 und PC_3. Die Dienste sind in Abbildung 9.1, 9.9 und 9.10 dargestellt. Man erkennt, dass PC_2 eine Verfeinerung des Producer/Consumer Dienstes PC bezüglich der Rolle $Cons$ und PC_3 eine Verfeinerung bezüglich der Rolle $Prod$ ist.

$$ \begin{array}{rcl} \mathcal{R} & = & 2^{Rol} \setminus \{\emptyset\} \quad \text{mit} \quad Rol = \{Prod, Cons, DM, Cons_1, Cons_2, Prod_1, Prod_2\} \\ \mathcal{D} & = & \{PC, PC_2, PC_3\} \end{array} $$

Die Rollen der Dienste sind:

$$ \begin{array}{rcl} R(PC) & = & \{Prod, Cons\} \\ R(PC_2) & = & \{Prod, DM, Cons_1, Cons_2\} \\ R(PC_3) & = & \{Prod_1 Prod_2, Cons\} \end{array} $$

Die Profile realisieren die Rollenprofile $R(P) = \mathcal{R}$ und überdecken daher die Rollenmenge der Dienste $R(PC) \cup R(PC_2)$.

Wir überprüfen die notwendige Implementierungs- und Verfeinerungsbeziehung für die Transition t_1. Es gilt $p(t_1) = p_0$. Die Rollenkompatibilität ist:

$$R({}^\bullet t_1) = \{Prod, Cons\} \subseteq R(D(t_1)) = \{Prod, Cons\}$$

Da sogar $R({}^\bullet t_1) = R(D(t_1))$ gilt, ist t_1 sogar vollständig. Da $D_t = D(t_1)$ gilt und die Rollen des Vorbereichs auf den Nachbereich aufgeteilt werden, gilt die Verhaltensverfeinerung. Die Verhaltensverfeinerung gilt, da D_t entweder gleich PC oder aber gleich $PC[Prod] \| PC_3[Cons]$ ist, und im letzteren Fall gilt: $PC_3[Cons]$ ist verhaltensgleich mit $PC[Cons]$.

Für t_2 ist nur ein Nachbereichsdienst möglich $D_t = PC_3[Prod_1] \| PC_3[Prod_2] = PC_3[Prod_1, Prod_2]$. Es ergibt sich die Verhaltensverfeinerung: $D(t_2)[R(p_1)] = PC[\{Prod\}]$ ist verhaltensgleich zu $D_t[R(t_2{}^\bullet)] = PC_3[\{Prod_1, Prod_2\}]$.

Analoges gilt für die restlichen Transitionen. Insgesamt zeigt sich, dass das R/D-Netz wohlgeformt ist. ◇

Wegen $|{}^\bullet t| = 1$ können wir folgende Schreibweise definieren: $D[t] := D(t)[R(p(t))]$. Betrachten wir speziell Teamnetze, d.h. Kausalnetze, dann ergibt sich die Nachbreichsauswahl eindeutig, da ja $|p^\bullet| = 1$ gilt. Falls $|p^\bullet| = 1$ gilt, definieren wir $D[p] := D(t)[R(p)]$ für das eindeutig bestimmte $t \in p^\bullet$. Identifiziert man die einelementige Menge $p^\bullet = \{t\}$ mit t, so notieren wir $D(p^\bullet)$ statt $D(t)$ und erhalten für $|p^\bullet| = 1$ zur Vereinfachung der Notation die Definition:

$$D[p] := D(p^\bullet)[R(p)] \text{ für } |p^\bullet| = 1 \text{ und } D[t] := D(t)[R(p(t))] \tag{10.6}$$

Die für wohldefinierte Teamnetze lokal gefordert Rollenverfeinerung erweitert sich auf die gesamte Struktur. Für einen Stellenmenge C eines Teamnetzes (N, R, D) definiere die folgende Komposition:

$$D[C] := D[R(C)] := \Big\|_{p \in C} D[p] = \Big\|_{p \in C} D({}^\bullet p)[R(p)] \tag{10.7}$$

Theorem 10.11 *Sei (N, R, D) ein wohlgeformtes Teamnetz mit der initialen Stelle p_0. Dann gilt, dass das Dienstnetz $D[C]$ für jeden Stellenschnitt $C \neq \{p_0\}$ wohldefiniert ist, und die Rollen $R(C)$ eine Verfeinerung von $R(p_0)$ bilden:*

$$D(p_0{}^\bullet)[R(p_0)] \simeq D[R(C)]$$

Beweis: Beweis per Induktion über die Tiefe des Teamnetzes.

Induktionsanfang: Der Induktionsanfang bildet das kleinstmögliche Teamnetz, das aus einer Stelle p_0 besteht, die mit der einzigen Transition t mit einer Kante verbunden ist. Der einzige Schnitt ist $C = \{p_0\}$. Also muss nichts gezeigt werden.

Induktionsschritt: Für den Induktionsschritt nutzen wir aus, dass jedes Teamnetz N durch ein Netz N_0 gebildet wird, das aus einer einzigen Transition t mit ${}^\bullet t = \{p_0\}$ und $t^\bullet = \{p_1, \ldots, p_k\}$ besteht, und den Subteams $N_1, \ldots, N_k$,

deren initiale Stelle jeweils die $p_1, \ldots, p_k$ sind. Jeder Stellenschnitt $C \neq \{p_0\}$ setzt sich aus Schnitten C_i der Subteams zusammen: $C = \bigcup_{i=1}^{k} C_i$.

Da die Subteams alle kleiner sind, gilt für sie die Induktionsannahme, d.h. alle $D[C_i]$ sind wohldefiniert und die $R(C_i)$ realisieren in $D[C_i]$ jeweils $R(p_i)$, d.h. $D[C_i] \simeq D[R(p_i)]$

Nach der Zerlegungseigenschaft ist die Komposition $\|_{i=1}^{k} D(t)[R(p_i)]$ definiert. Wegen der Verhaltensverfeinerung nach Induktionsannahme ist daher auch die Komposition $\|_{i=1}^{k} D[C_i]$ definiert. Damit ergibt sich:

$$\begin{array}{rcll} D(t)[R(p_0)] & \simeq & \|_{i=1}^{k} D(t)[R(p_i)] & \text{(Wohlgeformtheit)} \\ & \simeq & \|_{i=1}^{k} D[C_i] & \text{(Annahme)} \\ & = & \|_{i=1}^{k} \|_{p \in C_i} D[p] & \\ & = & \|_{p \in C} D[p] = D[C] & \end{array}$$

Also realisiert $D[C]$ die Rolle $R(p_0)$. q.e.d.

Diese Eigenschaft gilt offensichtlich auch, wenn (N, R, D) ein Subteam eines größeren R/D-Netzes ist, da jedes Subteam ebenfalls wohlgeformt ist.

Dass $D[C]$ eine Verfeinerung ist, heißt insbesondere, dass die Menge der Kommunikationskanäle durch C disjunkt aufgeteilt wird. Für wohlgeformte Teams ist es ausgeschlossen, dass sich Rollen zyklisch für ihre Arbeit heranziehen. Dies gilt nur für stotterfreie R/D-Netze. Stottern bedeutet, dass eine Aufgabe nur von einer Rolle zur nächsten gereicht wird. Der Delegationsprozess ist nicht produktiv – er stottert, und dies ist nicht erwünscht.

Theorem 10.12 *Ein R/D-Netz stottert, wenn es eine Transition t mit $|t^\bullet| = 1$ gibt. Sei (N, R, D) ein wohlgeformtes, stotterfreies Teamnetz mit der initialen Stelle p_0. Sei $p \in P$ eine Stelle mit $R(p) = R(p_0)$, dann gilt $p = p_0$.*

Beweis: Sei $C_0 = \{p_0\}$ und sei C ein Stellenschnitt mit $p \in C$. Nach Theorem 10.11 realisieren sowohl $D[C_0]$ als auch $D[C]$ die Rolle $R(p) = R(p_0)$. Sie besitzen somit auch die gleichen externen Kommunikationskanäle. Daraus folgt, dass $D[R(C \setminus \{p\})]$ keinerlei Kommunikationskanäle besitzt. Da jedes Dienstnetz D nach Definition (Def. 9.12) für jedes Rollenzerlegung $R, (R(D) \setminus R)$ mit $R \neq \emptyset$ und $(R(D) \setminus R) \neq \emptyset$ Kanäle besitzen muss, ist dies nur möglich, wenn $C = \{p\}$ gilt. Dann muss aber $p = p_0$ gelten, da das Teamnetz nicht stottert. q.e.d.

Ein besonderer Fall liegt vor, wenn das Teamnetz homogen ist, d.h. wenn alle Dienstnetze $D(t)$ identisch sind. Abbildung 10.7 zeigt ein die homogene Variante des nicht homogenen Teamnetzes aus Abbildung 10.6. In diesem Fall vereinfacht sich Definition 10.10, denn homogene wohlgeformte Teamnetze haben die Eigenschaft, die zu implementierenden Rollen nur aufzuteilen, nicht aber zu verfeinern.

Lemma 10.13 *Ein R/D-Netz (N, R, D) heißt* homogen*, wenn $D(t_1) = D(t_2)$ für alle $t_1, t_2 \in T_N$ gilt. Wenn (N, R, D) ein wohlgeformtes Teamnetz ist, dann gilt für alle Transitionen $t \in T$, dass $\{R(p) \mid p \in t^\bullet\}$ eine Mengenpartition von $R({}^\bullet t)$ gilt.*

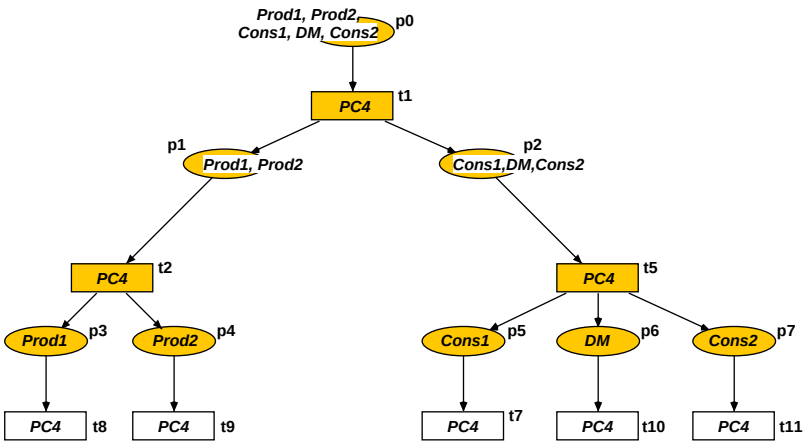


Abbildung 10.7: Ein homogenes Team

Beweis: Da (N, R, D) ein wohlgeformtes Teamnetz ist, gilt die Verhaltensgleichheit von $D(t)[R(^\bullet t)]$ und $D_t = \|_{p \in t^\bullet} D[p]$. Aufgrund der Homogenität gilt $D_t = \|_{p \in t^\bullet} D[p] = D[R(t^\bullet)]$ erhalten wir $D(t)[R(^\bullet t)] \simeq D(t)[R(t^\bullet)]$. Daraus folgt insbesondere $R(^\bullet t) = R(t^\bullet)$. Mit der Zerlegungseigenschaft folgt zudem noch, dass $\{R(p) \mid p \in t^\bullet\}$ disjunkte Menge sind. q.e.d.

10.2.2 Teamprozesse

Bezeichne $\mathcal{K}^{pg}(N, m)$ die Menge aller endlichen Prozesse von (N, m) unter der Fortschrittsannahme. Hierbei steht noch nicht fest, ob für ein gegebenes Delegationsnetz ein endlicher Prozess unter der Fortschrittsannahme überhaupt existiert. So könnte es sein, dass unter der Fortschrittsannahme keine endlichen Prozesse generiert werden. So zeigt Abbildung 10.8 ein Netz, das für $m = \{p_1\}$ gar keine endlichen Prozesse (N, m) unter der Fortschrittsannahme besitzt.

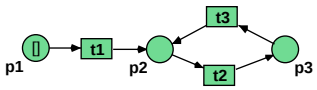


Abbildung 10.8: Ein R/D-Netz ohne Tätigkeitspfade

Theorem 10.14 *Sei N ein Delegationsnetz.*

1. *Ein Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, m)$ besteht aus $|m|$ disjunkten Teilprozessen.*
2. *Die Prozesse $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, m)$ von Delegationsnetzen sind Bäume.*
3. *Jeder Prozess korrespondiert zu einem Ableitungsbaum in $G(n, m)$.*

Beweis: Dies folgt aus der Linearitätseigenschaft, denn jede Marke wird disjunkt entwickelt.

Prozesse sind als Kausalnetze bereits azyklisch, im allgemeinen aber keine Bäume. Die Baum-Eigenschaft folgt aus der Struktur der Transitionen, genauer aus $|{}^\bullet t| = 1$.

Da die Struktur der Grammatik $G(N, m)$ das Netz direkt abbildet, korrespondieren Prozesse und Ableitungsbäume. q.e.d.

Theorem 10.15 *Sei N ein Delegationsnetz in der Markierung m und sei $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, m)$ ein Prozess, dann gilt:*

1. *$\phi(K^\circ) \subseteq T$.*
2. *Jede Folge $\phi(w)$ mit $({}^\circ K \cap B) \xrightarrow{w} (K^\circ \cap B)$ ist ein Tätigkeitspfad.*
3. *Mindestens eine Schaltfolge $\phi(w)$ mit $({}^\circ K \cap B) \xrightarrow{w} (K^\circ \cap B)$ wird von der Grammatik $G(N, m)$ erzeugt.*
4. *$\mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ ist genau dann eine nicht-leere Menge, wenn A_p produtiv in $G(N, m)$ ist.*

Beweis:

1. $\phi(K^\circ) \subseteq T$ ist äquivalent zu $K^\circ \subseteq E$. Da N keine Senken besitzt ($p^\bullet \neq \emptyset$), gibt es zu jeder Stelle mindestens eine Transition im Nachbereich. Wäre eine Stelle b in K°, dann wäre eine dieser Transition aktiviert – im Widerspruch zu der Annahme, dass K ein Prozess von (N, m) unter der Fortschrittsannahme ist.

2. Da $\phi^\sharp({}^\circ K) = m$ und $\phi(K^\circ) \subseteq T$ gilt haben wir $m = \phi^\sharp({}^\circ K) \xrightarrow{\phi(w)} \phi^\sharp(K^\circ \cap B) = \phi^\sharp(\emptyset) = \mathbf{0}$, d.h. das $\phi(w)$ ein Tätigkeitspfad ist.

3. Jede Ableitung in der Grammatik $G(N, m)$ beschreibt mindestens einen Ablauf in N, wenn auch nicht alle möglichen Permutationen nebenläufiger Ereignisse betrachtet werden.

4. Nach Theorem 10.6 ist die Variable A_p genau dann produktiv, wenn $\mathbf{0}$ von $m = \{p\}$ erreichbar ist. Dies gilt genau dann, wenn es einen Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, m)$ gibt, der $\phi(K^\circ) \subseteq T$ erfüllt, was nach (1) genau dann gilt, wenn überhaupt ein Prozess existiert, d.h. wenn $\mathcal{K}^{pg}(N, m) \neq \emptyset$.

q.e.d.

10.2.3 Bearbeitbarkeit in R/D-Netzen

Die Bedingung, dass eine Stelle sicher bearbeitbar ist, ist verwandt mit der Korrektheitsbedingung für Workflownetze. Im Gegensatz zu korrekten Workflownetzen sind R/D-Netze im allgemeinen jedoch nicht beschränkt. Daher scheidet eine Analyse des Erreichbarkeitsgraphen aus, da dieser im allgemeinen nicht endlich ist. Wir nutzen stattdessen die speziellen Eigenschaft von Delegationsnetzen, um die Analyse der Tätigkeitspfade zu vereinfachen, hier insbesondere die Linearitätseigenschaft von Delegationsnetzen.

Theorem 10.16 *Sei $RD = (N, R, D)$ ein R/D-Netz und m seine Markierung.*

1. *$TP(m)$ ist genau dann eine nicht-leere Menge, wenn m bearbeitbar ist.*
2. *Ist die Marking m sicher bearbeitbar, dann ist sie auch bearbeitbar.*
3. *N ist genau dann sicher bearbeitbar, wenn es bearbeitbar ist.*
4. *Die Markierung m ist in N bearbeitbar genau dann, wenn alle Markierungen $\{p\}$ mit $m(p) > 0$ bearbeitbar sind.*
5. *Es ist in $O(|N|)$ entscheidbar, ob die Markierung m bearbeitbar ist.*
6. *Es ist in $O(|N|)$ entscheidbar, ob die Markierung m sicher bearbeitbar ist.*
7. *Sind alle Stellen $p \in P$ bearbeitbar, dann ist N sicher bearbeitbar.*
8. *Ist N sicher bearbeitbar, dann ist N nicht (strukturell) lebendig.*

Beweis:

1. Direkt aus der Definition der Bearbeitbarkeit.
2. Folgt aus Definition mit $m \in RS(m)$.
3. Offensichtlich gilt, dass N bearbeitbar ist, wenn es sicher bearbeitbar ist. Ist N bearbeitbar, dann folgt für alle Markierungen, also insbesondere auch für die erreichbaren Markierungen $m' \in RS(m)$ Bearbeitbarkeit. Also folgt, dass N sicher bearbeitbar ist, wenn es bearbeitbar ist.
4. Mit der Linearitätseigenschaft $RS(m_1 + m_2) = RS(m_1) + RS(m_2)$ der Delegationsnetze (Theorem 10.3) folgt:

$$RS(m) = RS\left(\sum_{p \in P} m(p) \cdot p\right) = \sum_{p \in P} m(p) \cdot RS(\{p\})$$

   Also sind die erreichbaren Markierungen durch die Mengen $RS(\{p\})$ charakterisiert.
5. Mit (3) ist die Markierung m bearbeitbar genau dann, wenn alle Markierungen $\{p\}$ mit $m(p) > 0$ bearbeitbar sind. Nach Theorem 10.6 ist die Nullmarkierung $\mathbf{0}$ von $m = \{p\}$ in N genau dann erreichbar, wenn das Nonterminal A_p der kontextfreien Grammatik $G(N, m)$ produktiv ist. Um Produktivität zu entscheiden, sind die Mengen $PV_n(G)$ zu bilden, wobei n höchstens bis zur Anzahl der Nonterminale wächst. In $G(N, m)$ gibt es zu jeder Stelle p genau ein Nonterminal A_p. Bei der Konstruktion von $PV_n(G)$ sind alle Regeln zu beachten. In $G(N, m)$ gibt es zu jeder Transition t genau eine Regel. Also ist der Aufwand von der Ordnung $|P| \cdot |T| = |N|$.

6. Mit (3) ist die Markierung m sicher bearbeitbar genau dann, wenn alle Markierungen $\{p\}$ mit $m(p) > 0$ sicher bearbeitbar sind. Nach Theorem 10.6 ist die Markierung $m = \{p\}$ genau dann sicher bearbeitbar, wenn alle erreichbaren Variablen A_p der kontextfreien Grammatik $G(N, m)$ produktiv sind. Die produktiven Variablen $PV_n(G)$ sind nach (4) mit $O(|N|)$ Zeitaufwand zu berechnen. Die erreichbaren Variablen sind durch die Konstruktion der monoton wachsenden Folge $RV_n(G)$ zu bilden, wobei n höchstens bis zur Anzahl der Nonterminale wächst. Analog zu der Menge der produktiven Variablen ist der Konstruktionsaufwand von der Ordnung $|P|\cdot|T| = |N|$. Insgesamt ist der Zeitaufwand also von der Ordnung $O(|N|)$.

7. Sind alle Stellen $p \in P$ bearbeitbar, dann sind alle Markierungen bearbeitbar, insbesondere alle $m' \in RS(m)$.

8. Da stets die Nullmarkierung erreichbar ist, kann das Netz stets in einen Deadlock geraten, also ist es nicht lebendig. Da dies für jede Anfangsmarkierung gilt, ist die Eigenschaft sogar strukturell.

Dies zeigt die Eigenschaften. q.e.d.

Zirkuläre Ausführungspfade existieren genau dann, wenn die Grammatik $G(N, m)$ Iterationen zulässt.

Theorem 10.17 *Sei (N, R, D) ein R/D-Netz und m seine Markierung. Es ist entscheidbar, ob N keine, endlich oder unendlich viele Tätigkeitspfade besitzt.*

Beweis: Dies gilt genau dann, wenn $L(G(N, m))$ leer, endlich oder unendlich ist. Diese Fragen sind für kontextfreie Grammatiken entscheidbar. q.e.d.

10.3 Koordination von Teams

Bei der Ausführung von Diensten werden Teilaufgaben entlang des Tätigkeitspfades weitergereicht, bis sie bei den terminalen Transitionen ankommen. Im Prozess in Abbildung 10.6 sind das t_8, t_{10}, t_{11}, t_{12} und t_{13}. Durch die Netzstruktur ist sichergestellt, dass die Agenten, die diesen Transitionen zugeordnet sind, die Interaktion gemäß des Dienstes PC_2 ausführen können. Der gesamte Prozess dient aber nur dazu, eine einzige Aktivität zu realisieren, nämlich die durch t_1 angestoßen wurde, d.h. $D(t_1)$. Man könnte meinen, dass die vor den terminalen Transitionen liegenden Ebenen (im Beispiel sind dies t_1, t_2, t_5 und t_7) keinerlei Funktion haben, außer dass sie entscheiden müssen, an wen sie die Aufgaben delegieren. Dies ist nicht ganz so, denn die Aufgabe dieser Agenten besteht unter anderem darin, globale Gültigkeitsbedingungen (wie z.B. Termination der Dienstnetze o.ä.) entlang der Tätigkeitspfade zu garantieren.

10.3.1 Steuerung

Jeder Transition wird durch die Abbildung $\psi : T \to PF_{\mathcal{D}}$ eine Prozessformel zugewiesen, die die Menge der *zugelassenen Prozessen* definiert. Wir unterscheiden hier zugelassene Prozesse von korrekten. Korrektheit spricht hier die formale

Spezifikation an, während zugelassene Prozesse mit einer Form der Steuerung zu realisieren sind. Die Steuerung ψ ist der technischen Ausdruck der organisationalen Sozialstrukturen. In SONAR wird die Steuerung ψ eines Dienstes D durch ein Koordinierungsprotokoll implementiert, das die Schaltmöglichkeiten der Dienstnetze reguliert.

Wir fordern, dass die Abbildung $\psi(t)$ mindestens einen Prozess des Dienstnetzes $D(t)$ erlaubt, d.h. die Steuerung ist realisierbar.

Definition 10.18 *Ein* koordinierendes Team *ist das Tupel* (N, R, D, ψ)*, wobei gilt:*

- (N, R, D) *ist ein R/D-Netz.*
- $\psi : T_G \to PF_{\mathcal{D}}$ *ist die lokale Steuerung.*

Ein koordinierendes Team (N, R, D, ψ) *ist* wohlgeformt*, wenn* (N, R, D) *dies ist und die Steuerung realisierbar ist:*

$$\forall t \in T : Proc(D(t), \psi(t)) \neq \emptyset$$

Aus der lokalen Steuerung $\psi : T \to PF_{\mathcal{D}}$ ergibt sich für jede Transition $t \in T$ eines koordinierenden Teams die *globale Steuerung* $\hat{\psi}$, indem wir alle F-Vorgänger miteinbeziehen:

$$\hat{\psi}(t) := \bigwedge_{(t',t)\in F^*} \psi(t') \tag{10.8}$$

Man beachte, dass die globale Steuerung $\hat{\psi}(t)$ eine endliche Konjunktion ist, da es nur endliche viele Elemente t' mit $(t', t) \in F^*$ gibt, nämlich höchstens alle $t \in T$.

Wir definieren Koordination hier allgemein für Delegationsstrukturen, werden aber im folgenden nur Kausalnetze betrachten, da wir an Teamprozessen interessiert sind. In einem Kausalnetz beschreibt $\hat{\psi}(t)$ also genau die Konjunktion aller lokalen Steuerungbedingungen von der Initialisierung des Teams bei p_0 bis hin zu t.

Die Steuerung ψ schränkt die Abläufe insofern ein, als dass wir für die Planung eines Agenten nur solche Dienstznetzprozesse des Dienstes $D(t)$ zulassen wollen, die $\hat{\psi}(t)$ erfüllen. Die lokale Steuerung ψ hat die Aufgabe, den akteursbezogenen Planungsprozess vorab einzuschränken, während die globale Steuerung die Handlungswahl eines im Team planenden Agenten noch weiter einschränkt.

10.3.2 Teamdienste

Jedes Teamnetz definiert durch seine maximalen Transitionen K° eine Interaktion. Jede Transition $t \in K^\circ$ führt den Anteil des Dienstes $D(t)$ aus, der durch die Rolle $R(p(t))$ der Stelle im Vorbereich von t definiert ist:

$$D(G) := \Big\|_{t\in K^\circ} D(t)[R(p(t))] \tag{10.9}$$

Aus Theorem 10.11 folgt, dass $D(G)$ wohldefiniert ist, denn es gilt:

$$D(G) := \|_{t\in K^\circ} D(t)[R(p(t))] = \|_{p\in {}^\bullet(K^\circ)} D(p^\bullet)[R(p)] = D[{}^\bullet(K^\circ)]$$

Für homogene Dienstnetze sind alle Dienstnetze $D(p^\bullet)$ identisch, so dass $D(G) = D(t)$ für jedes beliebige $t \in T$ gilt.

Für das Teamnetz in Abbildung 10.6 ergibt sich somit der Teamdienst:

$$\begin{array}{rl} & D(t_8)[R(p_3)]\|D(t_9)[R(p_4)]\|D(t_{13})[R(p_9)]\|D(t_{10})[R(p_8)]\|D(t_{11})[R(p_7)] \\ = & PC_3[Prod_1]\|PC_3[Prod_2]\|PC_2[Cons_1]\|PC_2[DM]\|PC_2[Cons_2] \end{array}$$

Man beachte, dass diese Interaktion weder PC_2 noch durch PC_3 beschrieben wird, sondern eine Kombination aus beiden darstellt.

Ebenso ergibt sich die Teamsteuerung $\hat{\psi}(G)$ als:

$$\hat{\psi}(G) := \bigwedge_{t\in K^\circ} \hat{\psi}(t) \tag{10.10}$$

Definition 10.19 *Sei G ein koordiniertes Team, dann ist der* Teamdienst *definiert als $D(G) := \|_{t\in K^\circ} D(t)[R(p(t))]$ und die* Teamsteuerung *definiert durch $\hat{\psi}(G) := \bigwedge_{t\in K^\circ} \hat{\psi}(t)$.*

Rollenkomponenten und Teamdienste sind miteinander verträglich.

Lemma 10.20 *Sei G ein Team, dann gilt für alle $t \in K^\circ$ und für beliebige Formeln $\phi \in PF_{\mathcal{D}}$:*

$$Proc(D(G), \phi) \subseteq Proc(D(G)) \subseteq Proc(D(t)[R(p(t))])$$

Beweis: Mit Theorem 9.30 folgt:

$$\begin{array}{rcl} Proc(D(G)) & = & Proc(\|_{t\in K_G{}^\circ} D(t)[R(p(t))]) \\ & = & \bigcap_{t\in K_G{}^\circ} Proc(D(t)[R(p(t))]) \subseteq Proc(D(t)[R(p(t))]) \end{array}$$

Die Inklusion $Proc(D(G), \phi) \subseteq Proc(D(G))$ ist offensichtlich. q.e.d.

10.4 Sonar-Agenten und Teamwork

Wir betrachten jetzt die Ausführungsumgebung und deren Handlungslogik, mit deren Hilfe die Organisationale Abläufe und Strukturen implementiert werden: den SONAR-Agenten. Die Teamaktivitäten werden von Agenten getragen, deren Struktur dem in Kapitel 8 dargestellte Akteursmodell entspricht. Die Team-Koordinierung wird durch die oberste, die sozial koordinierenden Schicht der Agentenarchitektur von Abb. 10.9 vorgenommen. Der Ansatz ist in Hinblick auf die Planungsprozesse an das BDI-Paradigma (Bratman, 1987; Rao und Georgeff, 1991) angelehnt; in Hinblick auf die architektuelle Strukturierung lehnt es sich an typische vertikal geschichtete Systeme an (Müller und Pischel, 1994).

Der SONAR-Agent aus Abbildung 10.9 besitzt drei Ebenen der Planung und zwei darauf operierende Metastrukturen. *Planer* dienen der strategiegesteuerten Exploration des Möglichkeitsraumes eines Dienstes. Berücksichtigt werden

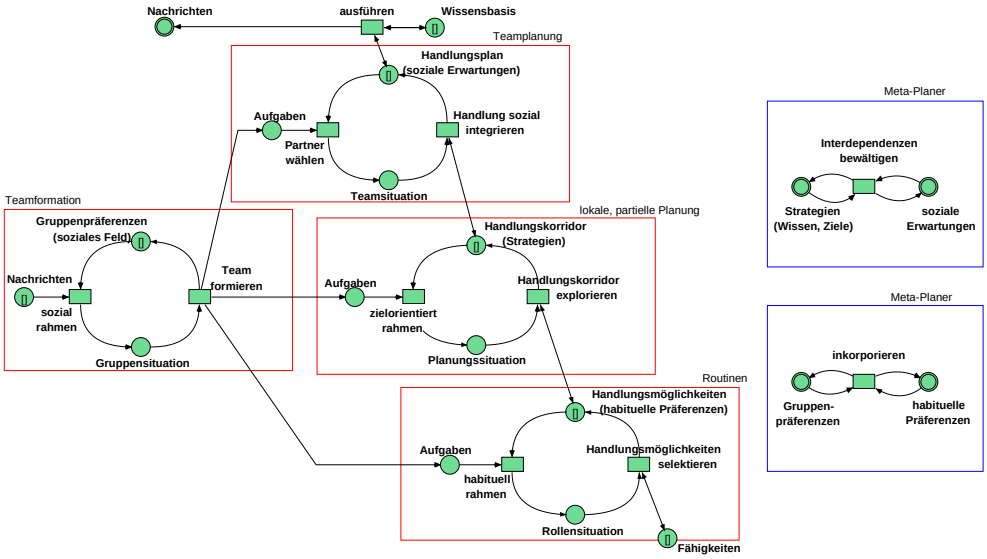


Abbildung 10.9: Die Planhierarchie im SONAR-Agenten

zum einen elementare Handlungsstrukturen und die Kompositionsoperatoren hierauf und zum anderen die Explorationssstrategien. Planer regeln das Verhalten der Transitionen: Handlungen sozial integrieren, Handlungskorridor explorieren und Handlungsmöglichkeiten selektieren. Planer bestehen initial aus dem aktuellen Handlungsraum, der sich aus der Historie der eingehenden Nachrichten und der internen Verarbeitung bestimmt. Im Beispiel sind dies die Stellen Handlungsplan, Handlungskorridor und Handlungsmöglichkeiten im SONAR-Agenten. Planer reagieren auf äußere Signale, kontextualisieren diese in bezug auf den Handlungsraum und adjustieren den Handlungsraum ggf. neu. Die Prozesse der Kontextualisierung und der Adjustierung sind abhängig von Parametern, nämlich den Fähigkeiten bezüglich der atomaren Handlungsmöglichkeiten (den Aufspannenden des Handlungsraumes) einerseits und den Adjustierungsstrukturen (habituelle Präferenzen, Strategien und soziale Erwartungsstrukturen) andererseits.

Die *Meta-Planer* dienen der Adaption und Reorganisation der Planer, indem sie die Planungsressourcen modifizieren oder ergänzen, beispielsweise indem Strategien angepasst, Handlungsroutinen erlernt, Agenten gegen andere ausgetauscht oder Koordinierungsregeln generiert werden. Es handelt sich um die beiden Transitionen: Interdependenzen bewältigen und inkorporieren.

Sei $\mathcal{D}$ eine Dienstklasse und sei $\mathcal{A}$ eine Menge an Agentennamen. Jeder Agent hat eine Menge von Verhaltensregelmäßigkeiten (VR), mit denen er auf jede Rolle R reagieren kann. Verhaltensregelmäßigkeiten sind u.a. Ausdruck normativen Verhaltens (Castelfranchi und Conte, 1995b; Castelfranchi u. a., 1999, siehe hierzu auch). Eine *Verhaltensregelmäßigkeit* δ ist ein Paar

$$(D, \{(R_1, A_1), \ldots, (R_n, A_n)\}) \in \mathcal{V}_R(\mathcal{D})$$

mit der Bedeutung, dass die Rolle R vom Dienst D implementiert werden soll, wobei die Rolle Rb nicht direkt eingenommen wird, sondern durch die Rollen

R_i, die jeweils an den Agenten A_i delegiert wird. Hierbei verfeinern die Rollen $R_1, \ldots, R_n$ die Rolle R im Dienst D. Es ist zu beachten, dass die Rolle R durch jedes $D \in \mathcal{D}(R)$ identisch charakterisiert wird, denn alle $D \in \mathcal{D}(R)$ definieren die Rolle auf die verhaltensgleiche Art und Weise. Die Menge aller Reaktionsschemata zu einer Rolle R ist:

$$\begin{array}{rl} \mathcal{V}_R(\mathcal{D}) := & \{(D, \{(R_1, A_1), \ldots, (R_n, A_n)\} \mid D \in \mathcal{D}(R), \\ & n \in \mathbb{N}, R_1, \ldots, R_n \text{ sind disjunkt} \\ & \exists D' \in \mathcal{D}(\bigcup_{i=1}^{n} R_i) : D[R] \simeq D'[\bigcup_{i=1}^{n} R_i] \\ & A_1, \ldots, A_n \in \mathcal{A}\} \end{array} \tag{10.11}$$

Die Menge aller Verhaltensregelmäßigkeiten ist:

$$\mathcal{V}(\mathcal{D}) := \bigcup_{R \in \mathcal{R}} \mathcal{V}_R(\mathcal{D})$$

Für jedes $\delta = (D, \{(R_1, A_1), \ldots, (R_n, A_n)\}) \in \mathcal{V}(\mathcal{D})$ definiere die Projektionen:

$$D_\Delta(\delta) := D \qquad R_\Delta(\delta) := R_1 \cup \cdots \cup R_n \qquad \mathcal{A}_\Delta(\delta) := \{A_1, \ldots, A_n\} \tag{10.12}$$

Jede Stelle $p \in P$ eines Teams beschreibt eine Aufgabe im Team. Die Transitionen $t \in T$ bearbeiten diese Aufgaben. In einem Gruppennetz wird jeder Tätigkeit t der Agent $A(t)$ zugewiesen, der die Tätigkeit ausführt. Es ist praktisch, auch dem Aufgaben p Agenten zuzuweisen. Wir fordern dabei $A(p) = A(t)$ für $p \in t^\bullet$, d.h. die vom Agenten $A(t)$ generierten Teilaufträge sind ihm auch zugeordnet.

Definition 10.21 *Ein* Gruppennetz $G = (N, R, D, \psi, A)$ *besteht aus einem Teamnetz* (N, R, D, ψ) *und der Besetzung* $A : (P \cup T) \to \mathcal{A}$ *mit* $A(p) = A(t)$ *für alle* $p \in t^\bullet, t \in T$.

Für eine Menge an Gruppennetze $\mathcal{G}$ *ist die Menge aller Profile definiert als* $\mathcal{P}_\mathcal{G} := \bigcup_{G \in \mathcal{G}} P_G$ *und die Menge aller Tätigkeiten als* $\mathcal{T}_\mathcal{G} := \bigcup_{G \in \mathcal{G}} T_G$.

Ist der Kontext eindeutig, so bezeichnen wir sowohl R/D-, Team- als auch Gruppennetze jeweils als *Team*. Ein Gruppennetz G wird auch als $A(p_0)$-*Team* bezeichnet, wegen der besonderen Bedeutung der initialen Stelle, die durch folgenden Satz charakterisiert wird.

Theorem 10.22 *Jede Abbildung* $A' : T \to \mathcal{A}$ *eines Teamnetzes wird durch durch die Definition von* $A(p_0)$ *für den minimalen Knoten* p_0 *eindeutig zu einer Besetzung* $A : (P \cup T) \to \mathcal{A}$ *erweitert.*

Beweis: $A(p_0)$ ist definiert. Wir setzen $A(t) = A'(t)$ für alle $t \in T$ und $A(p) = A'(t)$ für alle $p \in t^\bullet$. Somit ist die Eigenschaft der Definition aus Def. 10.21 erfüllt. Aus der Tatsache, dass N ein Kausalnetz mit $N^\circ \subseteq T$ ist, folgt, dass A für alle Knoten aus $P \cup T$ definiert ist. q.e.d.

10.4.1 Sonar-Agenten

Ein SONAR-Agent besitzt Strukturen zur Teambildung, zur Planung und zur Reorganisation durch Meta-Planung. Die Planung nutzt dabei die Dienstklasse $\mathcal{D}$. Außerdem ist definiert, welche Rollen der Agent einnehmen kann. Die Menge $\rho(D)$ bezeichnet die Menge der Rollen, die der Agent in der Lage ist einzunehmen. Gilt $\rho(D) = \emptyset$, so kann der Agent keine Rolle des Dienstes implementieren. Die Fähigkeiten $\rho(D)$ implizieren zudem, dass der Agent alle in der der Dienstkomponenten $D[\rho(D)]$ benötigten Rechte oder Ressourcen usw. besitzt.

Definition 10.23 *Sei $\mathcal{A}$ eine Menge an Agentennamen, $\mathcal{D}$ eine Dienstklasse zur Rollenstruktur $\mathcal{R}$ und $\mathcal{G}$ eine Menge an Gruppennetzen. Ein* SONAR-Agent

$$(\rho, \gamma, \Delta, \delta, \pi, \beta^1, \beta^2)$$

besteht aus folgenden Komponenten:

1. $\rho : \mathcal{D} \to \mathcal{R}$ *sind die Fähigkeiten, die $\rho(D) \subseteq R(D)$ für alle $D \in \mathcal{D}$ erfüllen.*
2. $\gamma : \mathcal{R} \to \mathcal{G}$ *ist die Teamgenerationsfunktion.*
3. $\Delta : \mathcal{G} \to \mathcal{P} \to 2^{\mathcal{V}(\mathcal{D})}$ *ist eine Selektionsfunktion der Verhaltensregelmäßigkeit.*
4. $\delta : \mathcal{G} \to 2^{\mathcal{V}(\mathcal{D})} \to \mathcal{P}_{\mathcal{G}} \to \mathcal{V}(\mathcal{D})$ *ist eine Selektionsfunktion des Handlungskorridors.*
5. $\pi : \mathcal{G} \to \mathcal{D} \to \mathcal{P}_{\mathcal{G}} \to Proc(\mathcal{D}, \mathcal{R})$ *ist eine Selektionsfunktion der sozialen Integration.*
6. β^1 *ist der Meta-Planer der Inkorporierung.*
7. β^2 *ist der Meta-Planer der Interdependenzbewältigung.*

Die Formationsfunktion γ und die Selektionsfunktionen Δ, δ und π besitzen die im nachfolgenden definierten Eigenschaften (10.13) bis (10.16).

Eine Konfiguration *eines Agenten wird durch die Fähigkeiten ρ, den Teamplaner γ und durch die Selektionsfunktionen Δ, δ und π definiert:*

$$(\rho, \gamma, \Delta, \delta, \pi)$$

Die Menge aller SONAR*-Agenten wird mit $\mathcal{S}_{(\mathcal{A},\mathcal{R},\mathcal{D},\mathcal{G})}$ bezeichnet (auch kurz als $\mathcal{S}$, wenn der Kontext klar ist.).*

10.4.2 Wissensbasis eines Sonar-Agenten

Im SONAR-Modell sind Dienstnetze rein funktional spezifiziert, so dass mehrere nebeneinander ablaufende Dienstnetze nicht interferieren können. In der Praxis modellieren Transitionen aber einen Zugriff auf externe Datenspeicher, die im allgemeinen von mehreren Dienstnetzen geteilt werden.

Diese Einschränkung ist insofern gerechtfertigt, als dass wir mit SONAR Dienstnetze als Typen und nicht als ablaufende Prozesse betrachten. Auf diesem Abstraktionsgrad betrachten wir also gerade nicht die Laufzeitinstanzen von Dienstnetzen und deren Seiteneffekte. Dies kann man schon daran erkennen, dass der SONAR-Agenten keinerlei Strukturen spezifizieren, die dem internen Zustand eines Agenten (auch: seine Wissensbasis) definieren. Erweitern wir den SONAR-Agenten in Abb. 10.9 um einen solchen Datenspeicher z, dann ist insbesondere jede Handlungswahl zustandsabhängig, d.h. statt Δ verwenden wir $\Delta(z)$ usw. Dieser Zustand z bildet die Initialmarkierung des SONAR-Agenten aus Abb. 10.9. Es handelt sich um die Stellen Fähigkeiten, Handlungsmöglichkeiten, Handlungskorridor und Handlungsplan. Jede Auswahl, d.h. jedes Schalten einer Transition in Abb. 10.9 modifiziert den Zustand. Dies kommt durch die in Abb. 10.9 dargestellten Kreisläufe in den Planungsschichten zum Ausdruck.

Wir werden diese Erweiterung um Datenspeicher jedoch nicht explizit notieren, sondern gehen im folgenden davon davon aus, dass jede Planungstransition sowie jede Transition eines Dienstnetzes implizt auch den Datenspeicher modifiziert. Wir wollen aber dennoch im folgenden kurz skizzieren, wie ein solcher Datenspeicher modelliert werden könnte und wie man mit seiner Hilfe auch die Fähigkeiten eines Agenten charakterisieren kann.

Den Datenspeicher eines SONAR-Agenten können wir modellieren, indem wir eine globale Menge an Datenbankschlüsseln $\mathcal{DB}$ einführen. Diese Menge behandeln wir formal wie Stellen, die mit genau einer Marke markiert sind und die nur als Nebenbedingungen von Transitionen auftreten. Die Marke ist in der Signatur typisiert, d.h. jeder Datenbankschlüssel $p \in \mathcal{DB}$ wird durch die Abbildung d typisiert.

Jeder Agent A besitzt in seiner Datenbank Einträge zu den Schlüsseln $DB_A \subseteq \mathcal{DB}$. Die Abbildung $M_A : DB_A \to [\![K]\!]_A$ weist allen Datenbankschlüssel ihren aktuellen Wert zu. Datenbankschlüssel sind also mit den Namen von Variablen imperativer Programmiersprachen vergleichbar. Die Abbildung M_A beschreibt das aktuelle Faktenwissen des Agenten.

Die Transitionen von Dienstnetzen modifizieren Datenbankeinträge. Jedes Dienstnetz D wird mit einer weiteren Inschrift versehen, die angibt, wie die Schlüsselwerte modifiziert werden. Es gibt einen lesenden und einen schreibenden Zugriff, die durch Terme $l_{rd}(t)(p)$ bzw. $l_{wr}(t)(p)$ der Sorte $d(p)$ definiert werden. Jede Transition t in D modifiziert eine endliche Teilmenge $DB_t \subseteq \mathcal{DB}$ aller Schlüssel. Die Menge der Schlüssel eines Dienstnetzes D ergeben sich damit als $DB(D) := \bigcup_{t \in T_D} DB_t$. Die Modifikation wird durch die Abbildung l_{rd} für den lesenden und l_{wr} für den schreibenden Zugriff definiert:

$$l_{rd}, l_{wr} : T \to (\mathcal{DB} \to \mathbb{T}_{\Sigma,E}(X))$$

Hierbei sind $l_{rd}(t), l_{wr}(t)$ partielle Funktionen, die nur auf DB_t definiert sind, d.h. $l_{rd}(t), l_{wr}(t) : DB_t \to \mathbb{T}_{\Sigma,E}(X)$ sind total. Die Terme müssen – analog zu den Kantenausdrücken – passend zu Typ $d(p)$ typisiert sein, d.h. es muss $l_{rd}(t)(p), l_{wr}(t)(p) \in \mathbb{T}^{d(p)}_{\Sigma,E}(X)$ gelten.

In der graphischen Darstellung notieren wir die Modifikationen für $DB_t =$

$\{p_1, \ldots, p_n\}$ als die Transitionsinschrift in der folgenden Syntax:

$$l_{wr}(t)(p_1) \texttt{ <== } l_{rd}(t)(p_1) \texttt{ ; } \ldots \texttt{ ; } l_{wr}(t)(p_n) \texttt{ <== } l_{rd}(t)(p_n)$$

Ist die Menge der Schlüsseln DB_A, die ein Agent A in seiner Datenbank definiert, festgelegt, dann sind damit implizit auch seine Fähigkeiten festgelegt, d.h. die Information, welche Rollen der Agent einnehmen kann. Ein Agent kann nämlich eine Rolle $r \in R(D)$ dann einnehmen, wenn alle Datenbankschlüssel, die von Transitionen $t \in T_D$ mit $r(t) = r$ modifiziert werden, auch in der Datenbank des Agenten vorkommen: $\bigcup_{t \in r^{-1}(r)} DB_t \subseteq DB_A$. Die Menge $\rho_A(D)$ der Rollen, die der Agent A einnehmen kann, ergibt sich somit zu:

$$\rho_A(D) = \left\{ r \in R(D) \mid \bigcup\nolimits_{t \in r^{-1}(r)} DB_t \subseteq DB_A \right\}$$

Die Datenbankzugriffe, die der Agenten A durchführen kann, definieren also seine Fähigkeiten implizit mit.

Die Schaltregel wird erweitert, um auch die Modifikation der Daten zu modellieren:

- Eine Transition t unter der Variablenzuweisung $\alpha : X \to [\![K]\!]_A$ heißt genau dann in M *aktiviert*, wenn gilt:
  1. Die Schaltbedingung ist erfüllt: $A, \alpha \models G(t)$.
  2. Für alle $p \in P$ gilt $M(p) \geq \overline{\alpha}(W(p,t))$.
  3. Für alle $p \in DB_t$ gilt $l_{rd}(t)(p) = M_A(p)$.

  Verglichen mit der Standarddefinition ist hierbei nur die dritte Bedingung hinzugetreten.

- Die Nachfolgemarkierung ergibt sich für jede Stelle $p \in P$ wie zuvor als:

  $$M'(p) = M(p) - \overline{\alpha}(W(p,t)) + \overline{\alpha}(W(t,p))$$

  Die neue Datenbankbelegung M'_A ergibt sich wie folgt:

  $$M'_A(p) = \begin{cases} l_{wr}(t)(p), & \text{falls } p \in DB_t \\ M_A(p), & \text{sonst} \end{cases}$$

Ein besonders einfacher Fall liegt vor, wenn jeder Term $l_{rd}(t)(p)$ eine Variable ist, denn in diesem Fall können Datenbankzugriffe keine Transition am Schalten hindern. Auch die Konfliktauflösung wird nur durch die Markierung, nicht aber durch die Werte der Datenbank gesteuert. In diesem Fall wirken sich Interferenzen von Dienstnetzprozesse, die gemeinsame Datenbankstellen modifizieren, zwar auf das Endergebnis, nicht aber auf die Schaltfolgen selbst aus.

Man beachte, dass die Datenbankobjekte eine Quelle der Zwangsserialisierung von Transitionen darstellen, nämlich immer dann, wenn zwei Transitionen t_1 und t_2 auf das gleiche Datenobjekt zugreifen wollen. In diesem Fall sind dann diese beiden Transitionen nicht mehr nebenläufig, was sich in einer Modifikation der

Prozesssemantik ausdrückt. Die Menge der Schaltfolgen, d.h. der sequentialisierten Prozesse, verändert sich dagegen nicht, denn auch dann ist jede beliebige Schaltreihenfolge, d.h. sowohl t_1t_2 als auch t_2t_1, weiterhin möglich. Diese führen aber im allgemeinen zu unterschiedlichen Werten der Datenobjekte.

Die in der Definition hinzugefügten Bedingungen für Datenschlüssel sind konsistent mit der Sichtweise, nach der Datenbankwerte wie Nebenbedingungen der Transition t behandelt werden. In diesem Fall ergibt sich die Markierung M_A einfach als der Teil der Markierung von D, der sich auf Stellen in $\mathcal{DB}$ bezieht. Datenbankstellen werden hier dennoch gesondert behandelt, da auf ihren Wert im allgemeinen von allen Diensten eines Agenten zugegriffen werden kann. Dies führt zu dem weithin bekannten Problem in verteilten Datenbanken, dass die relative Ausführungsreihenfolge der Prozesse Auswirkungen auf den finalen Zustand der Datenbank hat (race conditions). Dies lässt sich zwar im Rahmen der Petrinetztheorie klar analysieren, indem man alle Netze an den geteilten Datenbankstellen vereinigt. Wodurch die Kausalbeziehungen zwischen den Dienstnetzen klar hervortritt. Dies geschieht allerdings um den Preis, dass man im allgemeinen ein riesiges Netz erhält, in dem die Einzelaktivitäten der Dienste nicht mehr gut zu erkennen sind.

Wir wollen diese Problematik in dieser Arbeit nicht weiter vertiefen und abstrahieren von nicht-funktionalen Anteilen in Dienstnetzen – wie den Datenobjekten – völlig, da unser Interesse primär der Gruppenaktivität und nicht der Verwaltung verteilter Daten gilt. Diese Abstraktion hat jedoch keine Auswirkungen auf den prinzipiellen Charakter der Betrachtung.

10.4.3 Formation eines Teams

In der formalen Darstellung beschreiben wir Teamwork als das Zusammenspiel von Teamgenerierung und Planung (vgl. Abb. 10.10), wobei verteiltes Planen noch in unterteilt wird: In der ersten Phase wird ein Teamplan generiert, in der zweiten Phase wird dieser gemeinsame Plan ausgeführt.

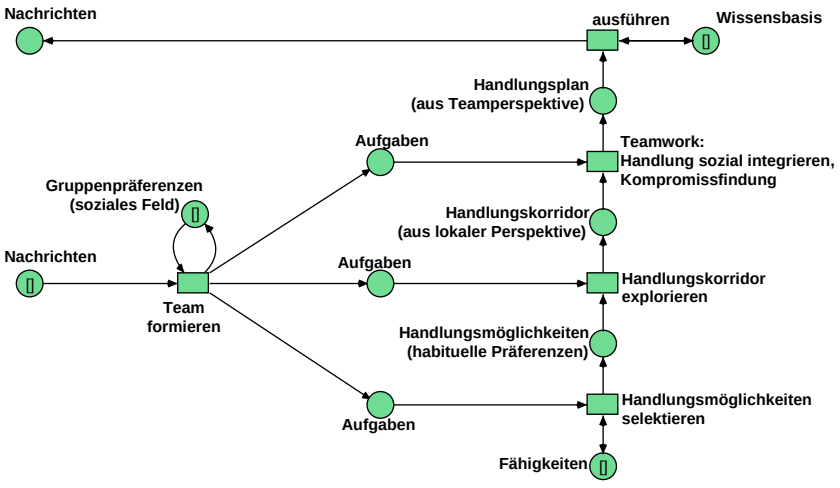


Abbildung 10.10: Die Planhierarchie als Vergröberung von Abbildung 10.9

Die beiden Abläufe – Teamgenerierung und -planung – sind nicht losgelöst voneinander zu betrachten, das sie durch die Bedingungen an die Wohlkoordiniertheit eng verpflochten sind. Die hier gewählte Darstellung besitzt den Vorzug, dass sie eine klare Spezifikation darstellt. Man darf sie jedoch nicht als Phasen eines Algorithmus misdeuten. Dieser würde zunächst ein Team generieren, dann würden alle Agenten des Teams lokal ihre Handlungen planen und schließlich würde dieser Plan, sofern er wohlkoordiniert ist, ausgeführt. Würde man die so umzusetzen, so erhielte man sicherlich keine effiziente Zusammenarbeit von Agenten. Es sind also die Präferenzen der Beteiligten – schon aus Effizienzgründen – bereits bei der Teamformation zu berücksichtigen.

Sei ein Multiagentensystem gegeben. Die Teamaktivität geht vom Agenten $A_0 \in \mathcal{A}$ aus, der die Teamaktivität anstößt. Das koordinierte Team, das A_0 generiert, muss ein A_0-Team sein. Es hat die Aufgabe die Rolle R_0 auszufüllen. Das Team wird in Abhängigkeit der Teamgenerationsfunktion $\gamma : \mathcal{R} \to \mathcal{G}$ des Agenten gebildet:

$$G_0 = \gamma(R_0) = (K_G, R_G, D_G, \psi_G, A_G) \quad \text{mit} \quad K_G = (P_G, T_G, F_G)$$

Das Team $\gamma(R_0)$ muß für alle $R_0 \in \mathcal{R}$ ein R_0-Team sein, d.h. die Rolle $R_G(p_0)$ der initialen Stelle p_0 des Teams (d.h. ${}^\circ K_G = \{p_0\}$) muss R_0 sein:

$$\forall R \in \mathcal{R} : R_G({}^\circ K_{\gamma(R)}) = R \tag{10.13}$$

Zur Aufgabe p_0 wählt A_0 einen Agenten A_{p_0}, der damit beauftragt wird, diese zu bearbeiten. Dazu wählt A_0 eine Aktivität t_0 sowie den Dienst $D_G(t_0)$ und setzt $A_G(t_0) = A_{p_0}$. Dabei muss D_0 in der Lage sein, die Rolle $R_G(p_0) = R_0$ zu implementieren (vgl. Def. 10.10). Die Aktivität wird realisiert, indem die Teilaufgaben $t_0{}^\bullet = \{p_1, \ldots, p_n\}$ generiert werden. Für diese legt $R_G(p_i)$ die jeweils zu implementierende Rolle fest, die dann vom Agenten A_{p_i} zu implementieren ist. Für diese Teilaufgaben wiederholt sich die Auswahl, solange bis keine weiteren Teilaufgaben mehr generiert werden (vgl. dazu auch Abschnitt 11.5.1). A_0 erzeugt also nicht nur seine lokale Aufgabenaufteilung, sondern entwirft bereits einen Plan für die gesamte Teamstruktur, in der auch die Aufgaben für andere Agenten festgelegt sind.

Das Team wird aber genauso von jedem anderen Teammitglied mitgestaltet. Eine Kante $(p, t) \in F$ bedeutet, dass der Agent $A_G(p)$ eine Aufgabe p dem Agenten $A_G(t)$ übertragt. Die Teamformation vollzieht sich bezüglich p für $A_G(t)$ auf die gleiche Art und Weise, wie für A_0 bezüglich p_0. Der Agent $A_G(t)$ generiert also mit seiner Auswahlfunktion $\gamma_{A_G(t)}$ das Subteam:

$$\gamma_{A_G(t)}(R(p))$$

Offensichtlich ist es notwendig, dass das Team zu den Absichten aller beteiligten Agenten des Teams passt, d.h. alle generierten (Sub-)Teams müssen zueinander passen und wohlkoordiniert sein. Bevor wir die Bedingungen in Definition 10.25 formalisieren, beschreiben wir zunächst den Planungsprozess im Team.

10.4.4 Plangenerierung im Team

Nach der Formation des Teams $G = (K_G, R_G, D_G, \psi_G, A_G)$ mit $K_G = (P, T, F)$ beginnen die Agenten mit der Handlungsplanung. Im Agenten ist der Rolle kein fester Dienst zugewiesen, d.h. es ist für ein Team G nicht statisch definiert, wie der Agent A_p die Rolle $R_G(p)$ realisiert. Dies ergibt sich anhand eines Planungsprozesses. Die Agenten des Teams werden von der Transition team formieren aktiviert, indem jeder Agent $A \in \mathcal{A}^*$, der einer finalen Transitionen des Teams zugeordnet ist, die Menge der ihm im Team durch A_G zugewiesenen Aufgaben berechnet. Diese Agenten realisieren den Teamdienst $D(G)$. Es handelt sich um die Stellen:

$$^\bullet(K^\circ \cap A_G^{-1}(A))$$

Man beachte, dass aus $K^\circ \subseteq T$ direkt $^\bullet(K^\circ \cap A_G^{-1}(A)) \subseteq P$ folgt.

Die Kanten $(p, t) \in F_G$ des Teamnetzes K_G stellen Implementationsbeziehungen dar. Da K_G ein Teamnetz ist, existiert zu jeder Tätigkeit t eine eindeutig bestimmte Stelle p im Vorbereich und zu jeder Stelle p eine eindeutig bestimmte Tätigkeit t im Nachbereich (vgl. Lemma 10.9). Die Aufgabe p wird von dem Agenten $A_G(t)$ implementiert. Dieser Agent $A_G(t)$ führt dann folgende Berechnung durch (vgl. dazu die Schaltfolgen des Netzes aus Abb. 10.9): Die Transition Handlungsmöglichkeiten selektieren trifft zwischen den Dienstnetzen $\mathcal{D}$ eine Auswahl, um die Rolle $R_G(p)$ auszufüllen. Die habituelle Präferenzordnung Δ generiert dazu eine Menge passender Verhaltensregelmäßigkeiten. Das Ergebnis

$$\Delta := \Delta(G)(p) \subseteq \mathcal{V}(\mathcal{D})$$

markiert dann die Stelle Handlungsmöglichkeiten, die in Abhängigkeit von den Fähigkeiten generiert werden. Da die Wahl in Abhängigkeit von p und nicht von $R_G(p)$ getroffen wird, kann die Auswahl flexibel von der Teamstruktur abhängen. Der Handlungskorridor ergibt sich, indem die Transition Handlungskorridor explorieren mit Hilfe der Strategie δ die Verhaltensregelmäßigkeit

$$\delta := \delta(G)(\Delta)(p)$$

selektiert und damit die Stelle Handlungskorridor markiert. Um Handlungen sozial zu integrieren, muss ein Plan, d.h. ein Prozess π der Komponenten

$$D[R_G(p)] \quad \text{mit} \quad D := D_\Delta(\delta)$$

ausgewählt werden, der zum einen die Teamsteuerung $\hat{\psi}_G(p^\bullet)$ respektiert und zum anderen zu den Plänen aller anderen Teammitglieder passt. Letzteres bedeutet, dass im Team ein gemeinsamer Teamplan π_G ausgehandelt wird (vgl. Definition 10.26). Die Auswahl leistet die Funktion π, die die sozialen Erwartungsstrukturen zum Ausdruck bringt. Der ausgewählte Prozess

$$\pi(G)(D)(p) \in \mathit{Proc}(D[R_G(p)], \hat{\psi}_G(p^\bullet))$$

ist dann der Handlungsplan der die Teamsteuerung erfüllt.

Handlungsplanung involviert drei verschiededene Klassen von *Sektionsfunktionen*:

1. Eine Selektionsfunktion der Verhaltensregelmäßigkeit ist eine Abbildung $\Delta : \mathcal{G} \to \mathcal{P} \to 2^{\mathcal{V}(\mathcal{D})}$ mit

$$\forall G \in \mathcal{G} : \forall p \in P_G : \Delta(G)(p) \subseteq \mathcal{V}_{R_G(p)}(\mathcal{D}) \tag{10.14}$$

2. Eine Selektionsfunktion des Handlungskorridors ist eine Abbildung $\delta : \mathcal{G} \to 2^{\mathcal{V}(\mathcal{D})} \to \mathcal{P}_{\mathcal{G}} \to \mathcal{V}(\mathcal{D})$ mit

$$\forall G \in \mathcal{G} : \forall \Delta \in 2^{\mathcal{V}(\mathcal{D})} : \forall p \in P_G : \delta(G)(\Delta)(p) \in \Delta \tag{10.15}$$

3. Eine Selektionsfunktion der sozialen Integration ist eine Abbildung $\pi : \mathcal{G} \to \mathcal{D} \to \mathcal{P}_{\mathcal{G}} \to \mathit{Proc}(\mathcal{D}, \mathcal{R})$ mit

$$\forall G \in \mathcal{G} : \forall D \in \mathcal{D} : \forall p \in P_G : \pi(G)(D)(p) \in \mathit{Proc}(D[R_G(p)], \hat{\psi}_G(p^\bullet)) \tag{10.16}$$

Die Formationsfunktion γ und die Selektionsfunktionen Δ, δ und π eines SONAR-Agenten besitzen nach Definition stets die obigen Eigenschaften (10.13) bis (10.16).

Anmerkung: In der obigen Modellierung liefern die Formationsfunktion γ und die Selektionsfunktionen Δ, δ und π genau ein Ergebnis, nämlich die beste Wahl. Für eine praktische Implementierung ist meist aber auch die zweitbeste Wahl von Interesse, beispielsweise falls innerhalb einer Gruppe ein Kompromiß gefunden werden muss. Um dies zu modellieren, gibt man statt einer Funktion eine komplette Präferenzordnung an, d.h. $\gamma(R_0)$ wäre eine Ordnung der Menge aller Teams $\mathcal{G}$, $\Delta(G)(p)$ würde in dieser Modellierung eine Ordnung der Menge der Teilmengen von Verhaltensregelmäßigkeiten $2^{\mathcal{V}(\mathcal{D})}$ sein, $\delta(G)(\Delta)(p)$ würde eine Ordnung auf der Menge der Verhaltensregelmäßigkeiten Δ darstellen und $\pi(G)(D)(p)$ eine auf der Prozessmenge $\mathit{Proc}(D[R_G(p)], \hat{\psi}_G(p^\bullet))$. Die Ordnungen kann man als surjektive Abbildung der natürlichen Zahlen in die jeweilige Grundmenge modellieren. Die Selektionsfunktionen ergeben sich dann jeweils als das Minimum bezüglich der jeweiligen Präferenzordnung.

10.4.5 Rekonfiguration der Agenten

Die Meta-Planer der Agenten reorganisieren den Planungsprozess, indem sie die Konfiguration des Agenten modifizieren. Dies ist beispielsweise dann nötig, wenn der Teamplanungsprozess keine Übereinkunft liefert. Wir haben zwei Formen der Meta-Planung. Zum einen ist im Modell aus Abb. 10.9 die Transition inkorporieren vorgesehen. Sie modifiziert mit Hilfe des Meta-Planers β^1 die Rollenfähigkeiten ρ, die Verhaltensregelmäßigkeiten Δ und die Teamformation γ:

$$\beta^1 : \rho \mapsto \rho', \gamma \mapsto \gamma', \Delta \mapsto \Delta'$$

Hierbei besitzt die Modifikation von ρ gegenüber denen von Δ oder γ eine besonderen Stellenwert, denn während eine Veränderung von Δ oder γ bedeutet, dass sich die Präferenzen des Agenten ändern, bedeutet eine Veränderung von ρ, dass der Agent sogar seine Fähigkeiten verändert. Der Agent kann daher auch lernen, bis dato unbekannte Rollen einzunehmen.

Zweitens haben wir noch die Transition Interdependenzen bewältigen, die mit Hilfe des Meta-Planers β^2 die Strategien δ und die Planung π modifiziert:

$$\beta^2 : \delta \mapsto \delta', \pi \mapsto \pi'$$

Die Unterscheidung der beiden entspricht ihrer Position in der internen Verabeitung. Für eine Inkorporation verändern sich die Fähigkeiten des Agenten oder die grundlegenden Verhaltensregelmäßigkeiten. Diese Parameter wirken sehr früh und sehr grundsätzlich auf den gesamten Interaktionsprozess ein. Für eine Interdependenzbewältigung werden dagegen die nachgelagerten Phasen des Planungsprozesses modifiziert. Wir wir in den beiden folgenden Kapiteln feststellen werden korrespondieren die beiden Ebenen dabei auch noch zur Definition der Organisation. Die Veränderung der Organisation eines Multiagentensystems, wie wir sie in Kapitel 12 betrachten, ist eine tiefgreifende Umgestaltung des Systems, und sie wirkt gerade auf die Parameter, die von der Meta-Planung der Inkorporation verändert werden.

Die Meta-Planung muss wieder koordiniert stattfinden. Meta-Planung ist eine Teamaktivitäten und ihre Dienst sind die Organisationstransformationen. Wir betrachten diese Form der Koordinierung von reflexiven Meta-Prozessen in Kapitel 12. Dort geben wir Kriterien an, welche Formen der Meta-Planung verträglich mit den MAS-Strukturen sind.

Die Selbstmodifikation ist ein algorithmisch aufwendiges Verfahren. Es ist daher im allgemeinen notwendig, die Strukturen des Multiagentensysteme so zu gestalten, dass möglichst alle Aufgabe realisierbar und das die Agenten Teams generieren, die vom Multiagentensystem abzeptierbar sind. Im folgenden Kapitel betrachten wir daher Organisation, die Multiagentensystem genau diese Strukturen bereitstellen.

10.5 Sonar-Multiagentensysteme und wohlgeformte Teamplanung

Betrachten wir nun, wie sich SONAR-Agenten zu Multiagentensystemen aggregieren lassen und wie sich innerhalb dieser Systeme wohlgeformte Teamplanung vollzieht.

10.5.1 Sonar-Multiagentensysteme

Im folgenden konstruieren wir ein Multiagentensystem, indem wir jedem Agentennamen A einen Agenten $\mu(A)$ zuordnen. Dieses Multiagentensystem nennen wir SONAR-*Multiagentensystem*, kurz: SONAR-MAS.

Definition 10.24 *Sei $\mathcal{A}$ die Menge aller Agentennamen. Ein* SONAR-Multiagentensystem *ist ein Tupel*

$$MAS = (\mathcal{A}_\mu, \mu),$$

wobei gilt:

- $\mathcal{A}_\mu \subseteq \mathcal{A}$ *ist eine endliche Menge an Agentennamen.*
- $\mu : \mathcal{A}_\mu \to \mathcal{S}$ *weist jedem Agentennamen einen* SONAR*-Agenten zu.*

Die *MAS-Grundstruktur* besteht aus den vorhandenen Agenten:

$$\mathcal{S}_{MAS} := \{\mu(A) \mid A \in \mathcal{A}_\mu\} \tag{10.17}$$

Jeder SONAR-Agent $\mu(A) \in \mathcal{S}_{MAS}$ besitzt die Komponenten $\Delta_{\mu(A)}$, $\delta_{\mu(A)}$ usw. Für jeden Agenten $A \in \mathcal{A}_\mu$ identifizieren wir A mit $\mu(A)$ und schreiben im Folgenden kurz Δ_A statt $\Delta_{\mu(A)}$ und analog für die anderen Komponenten.

Sei ein Multiagentensystem gegeben. Wie bereits erwähnt, muss das durch A_0 generierte Team

$$G_0 := \gamma_{A_0}(R_0) = (K_G, R_G, D_G, \psi_G, A_G)$$

zu den Absichten der beteiligten Agenten des Teams passen. Wir definieren $G_{\Uparrow p}$ als das Subteam ist, das aus $G = ((P, T, F), R, D, \psi, A)$ entsteht, wenn man es auf Knoten $\uparrow p$ (d.h. auf Knoten, die p bzgl. F^* nachfolgen) einschränkt:

$$G_{\Uparrow p} = ((P', T', F \cap (\uparrow p)^2), R|_{P'}, D|_{T'}, \psi|_{T'}, A|_{T'}) \quad \text{mit} \quad P' = P \cap \uparrow p, T' = T \cap \uparrow p$$

Jedes Subteam $G_{0\Uparrow p}$ von G_0 muss dann identisch mit dem Team sein, das $A_G(p)$ generiert. Auerdem müssen die Teamattribute zu den individuellen Präfenzen der Agenten passen. Wir formalisieren nun die dazu notwendigen Bedingungen.

Definition 10.25 *Sei ein Multiagentensystem* $(\mathcal{A}_\mu, \mu)$ *und ein Team* $G = (K_G, R_G, D_G, A_G)$ *mit* $K_G = (P, T, F)$ *gegeben. Das Multiagentensystem* akzeptiert G*, wenn gilt*

1. *Die Teamattribute (Dienste, Rollen und Agenten) passen zu den individuellen Präfenzen der Agenten:*

$$\forall (p,t) \in F_G : \forall \Delta : \delta_{A(t)}(G)(\Delta)(p) = (D_G(t), \{(R_G(p'), A_G(p'^\bullet)) \mid p' \in t^\bullet\})$$

2. *Das von* $A_G(t)$ *generierte Team* $\gamma_{A_G(t)}(R_G(p))$ *ist mit dem Subteam* $G_{\Uparrow p}$ *identisch:*

$$\forall (p,t) \in F_G : \gamma_{A_G(t)}(R_G(p)) = G_{\Uparrow p}$$

Die Menge aller vom Multiagentensystem akzeptierten Teams bezeichnen wir mit $\mathcal{G}_{akz}(\mathcal{A}_\mu, \mu)$*.*

Aus dieser Definition folgt, dass Teamformation erstens nicht von den habituellen Präferenzen und der Planung der Agenten zu trennen ist und dass sie zweitens ein verteilter Prozess ist.

Ist keines dieser Teams (im Sinne von Definition 10.25) akzeptierbar, so muss die Planung einiger (oder aller) Agenten nachkorrigiert werden, solange bis mindestens ein akzeptables Team existiert. Erfüllt dann keines dieser Teams die Teamsteuerung, so muss die lokale Steuerung ψ verschärft werden, bis die globale Steuerung Korrektheit garantiert – im Extremfall solange, bis die Korrektheit schon lokal erzwungen wird.

10.5.2 Wohlgeformte Teamplanung

Die einzelnen Pläne $\pi_A(G)(D)(p)$ der Agenten $A = A_G(t)$ für $(p,t) \in F_G$ müssen miteinander konsistent sein, d.h. zu einem gemeinsamen Teamplan π_G der Gruppe G passen. Ein Teamplan π_G ist ein Prozess des Teamnetzes $D(G)$, der zum einen die Steuerbedingung $\hat{\psi}(G)$ des Teams erfüllt und zum anderen einen korrekten Ablauf von $D(G)$ beschreibt. Die Menge aller Teampläne einer Gruppe G ist:

$$\begin{aligned} \mathit{Teampläne}(G) := \{ \quad & \pi_G \in \mathit{Proc}(D(G)) \mid \forall D \in \mathcal{D} : \forall t \in {K_G}^\circ : \\ & \pi_{A_G(t)}(G)(D)(p(t)) = \pi_G \wedge \pi_G \models \hat{\psi}_G(t) \wedge \\ & \phi(\pi_G{}^\circ) = M_f \wedge \pi(M_f) = m_f \} \end{aligned} \tag{10.18}$$

Hierbei meint $\pi(M_f)$ die Projektion der gefärbten Markierung M_f auf ungefärbte Marken.

Die lokale Wahl eines Agenten für seinen Plan ist durch die Selektionsfunktion π bestimmt, für die $\pi(G)(D)(p) \in \mathit{Proc}(D[R_G(p)])$ gefordert wird. Dies ist verträglich mit der der Eigenschaft des Teamplans π_G aus der Menge $\mathit{Proc}(D(G)))$ zu sein, denn nach Lemma 10.20 gilt die Inklusion:

$$\mathit{Proc}(D(G), \hat{\psi}(G)) \subseteq \mathit{Proc}(D(G)) \subseteq \mathit{Proc}(D(t)[R(p(t))])$$

Definition 10.26 *Ein Multiagentensystem $(\mathcal{A}_\mu, \mu)$ ist* wohlgeformt*, wenn für jeden Agent $A \in \mathcal{A}_\mu$ folgendes gilt:*

1. *A kennt nur Teampartner, die in $\mathcal{A}_\mu$ enthalten sind:*

$$\bigcup \{\mathcal{A}_\Delta(\delta) \mid G \in \mathcal{G}, p \in P_G, \delta \in \Delta_A(G)(p)\} \subseteq \mathcal{A}_\mu$$

2. *A verfügt über die im Teamdienst benötigten Fähigkeiten:*

$$\forall G \in \mathcal{G} : \forall e \in {K_G}^\circ : R_G({}^\bullet e) \subseteq \rho(D_G(e))$$

3. *In jeder Gruppe existiert ein gemeinsamer Teamplan π_G:*

$$\forall G \in \mathcal{G} : \exists \pi_G \in \mathit{Teampläne}(G)$$

In wohlgeformten Multigensystemen vefügen die Agenten über die im Team notwendigen Fähigkeiten.

Lemma 10.27 *Akzeptiert ein wohlgeformtes Multigensystem $(\mathcal{A}, \mu)$ das Team G, dann vefügt jeder Agent über die Fähigkeiten, die für die Ausführung der durch das Team festegelegten Rollen $R_G(t^\bullet)$ des Dienstes $D_G(t)$ notwendig sind:*

$$\forall t \in T : R_G(t^\bullet) \subseteq \rho_{A_G(t)}(D_G(t))$$

Beweis: Da das Team akzeptiert ist, entsprechen die Teamattribute den Präferenzen: $D_\Delta(\delta)) = D_G(t)$ und $R_\Delta(\delta) = R_G(t^\bullet)$. In einem wohlgeformten Multiagentensystem vefügt jeder Agent A über die benötigten Fähigkeiten: $R_\Delta(\delta) \subseteq \rho_A(D_\Delta(\delta))$, und jeder Agent kann nach Definition 10.23 aufgrund

der Eigenschaft von Δ nur solche Dienste wählen. Daraus folgt für $A = A_G(t)$ sofort $R_G(t^\bullet) \subseteq \rho_{A_G(t)}(D_G(t))$. q.e.d.

Durch diese Bedingung besitzen alle Agenten im Team einen Teamplan, der mit den Randbedingungen des Teams vereinbar ist. Der gemeinsame Teamplan π_G ist im allgemeinen Ergebnis eines verteilten Planungs- und Aushandlungsprozesse. Von praktischer Bedeutung ist hier die Problematik, die einzelnen individuellen Pläne $\pi_{A_G(t)}(G)(D)(p)$ in einem gemeinsamen Teamplan π_G – einem Kompromiß – zu integrieren.

Theorem 10.28 *Wenn $(\mathcal{A}_\mu, \mu)$ ein wohlgeformtes Multiagentensystem ist, dann generiert jedes Team G nur solche Teampläne $\pi_G \in Proc(D(G))$, die die Teamsteuerung $\hat{\psi}(G)$ erfüllen.*

Beweis: Da das Multiagentensystem wohlgeformt ist, existiert für jeden Gruppe ein gemeinsamer Teamplan π_G mit $\pi_A(G)(D)(p) = \pi_G$, der die Steuerbedingung erfüllt. Außerdem gilt $\pi_A(G)(D)(p) \in Proc(D[R_G(p)])$ nach Definition der Selektionsfunktion. Für alle Teampläne gilt:

$$\begin{array}{rcl} & & \forall t \in {K_G}^\circ : \pi_G \models \hat{\psi}_G(t) \wedge \pi_G \in Proc(D[R_G(p)]) \\ & \iff & \forall t \in {K_G}^\circ : \pi_G \in Proc(D_G[R_G(p(t))], \hat{\psi}_G(t)) \\ & \iff & \pi_G \in \bigcap_{t \in {K_G}^\circ} Proc(D_G[R_G(p(t))], \hat{\psi}_G(t)) \\ \text{mit Thm. 9.45} & \iff & \pi_G \in Proc(\|_{t \in {K_G}^\circ} D_G[R_G(p(t))], \bigwedge_{t \in {K_G}^\circ} \hat{\psi}_G(t)) \\ & \iff & \pi_G \in Proc(D(G), \hat{\psi}(G)) \end{array}$$

Als Teamplan muss π_G auch maximal sein, d.h. er muss den Dienst bis in die finale Markierung bringen: $\phi({\pi_G}^\circ) = M_f$. q.e.d.

Besonders praktisch sind solche Dienstnetze $D(G)$ des Teams G, die sogar unter der Steuerung $\hat{\psi}(G)$ noch schwach-korrekt sind, denn dann kann jedes Prozessanfangsstück eines gemeinsamen Teamplans stets zu einem terminierenden Prozess vervollständigt werden, da ein korrektes Dienstnetz in jeder erreichbaren Markierung nach Definition korrekt terminieren kann (vgl. Def. 9.46):

$$\begin{array}{rl} \forall M \in RS(D \times \psi, M_0) : & \pi(M) \geq m_f \Longrightarrow \pi(M) = m_f \wedge \\ & \exists M' \in RS(D \times \psi, M) : \pi(M') = m_f \end{array}$$

Ist $(D(G) \times \hat{\psi}(G))$ ein schwach-korrektes Dienstnetz, dann ist es also nicht notwendig, den Teamplan vorab gemeinsam festzulegen, da ja keine Aktion der Teammitglieder in eine Verklemmung führen kann. Die Verhandlungsphase der Teamplanung zur Festlegung von π_G kann daher entfallen. Da manche Teampläne aber besser als andere sein können, kann eine Verhandlung dennoch sinnvoll sein.

Wir definieren ein Teamnetz G als wohlkoordiniert, wenn der von ihm generierte Dienst $D(G)$ unter der Steuerung $\hat{\psi}(G)$ die Möglichkeit zur korrekten Termination besitzt.

Definition 10.29 *Eine Gruppe G heißt* wohlkoordiniert*, wenn $(D(G) \times \hat{\psi}(G))$ ein schwach-korrektes Dienstnetz ist. Ein wohlgeformtes Multiagentensystem $(\mathcal{A}_\mu, \mu)$ heißt* wohlkoordiniert*, wenn alle $G \in \mathcal{G}$ wohlkoordiniert sind.*

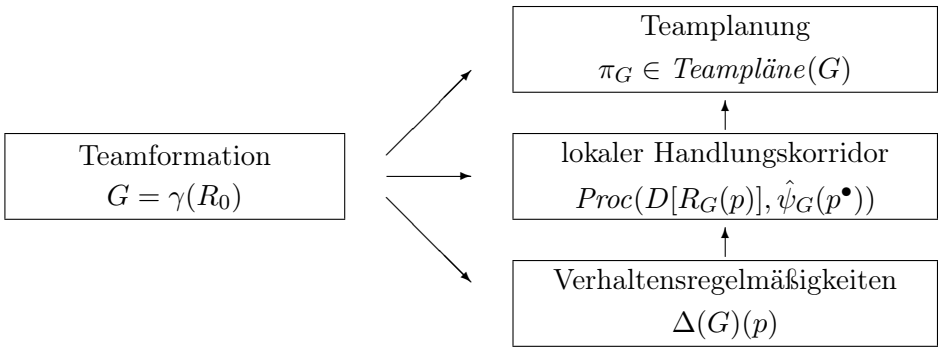


Abbildung 10.11: Der formale Teamplanungsprozess – vgl. Abb. 10.9

Die Eigenschaft eines Multiagentensystems, wohlkoordiniert zu sein, hängt direkt von der Struktur der Menge aller Teams $\mathcal{G}$ ab. Es ist daher im allgemeine nicht möglich, hinreichende Kriterien für die Wohlgeformtheit zu entwickeln, ohne etwas über den Aufbau von $\mathcal{G}$ zu wissen. Wir betrachten daher im folgenden Kapitel Organisationen als Strukturen, die die Menge $\mathcal{G}$ erzeugt, um so Aussagen über die Wohlgeformtheit treffen zu können.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir die Koordinierung in Agentensystemem betrachten. Wir haben das Modell der Rollen/Dienst-Netze (R/D-Netze) entwickelt, um die Interaktion in Teams zu beschreiben. Rollen/Dienst-Netze sind Petrinetze, deren Transitionen mit Dienstnetzen und Stellen mit Rollen verbunden sind. Teamnetze sind spezielle Rollen/Dienst-Netze, bei denen die Delegationsstruktur eindeutig festgelegt ist, was sich im Netz in der Eigenschaft wiederspiegelt, dass Teams Kausalnetze sind.

Rollen/Dienst-Netze sind spezielle Delegationsnetze, d.h. Netze, die genau eine Stelle im Vorbereich besitzen. Diese Eigenschaft impliziert, dass die Erreichbarkeitsmengen von Delegationsnetzen linear sind und die Menge der Tätigkeitspfade kontextfrei. Diese Eigenschaft konnten wir ausnutzen, um die Bearbeitbarkeit von Aufgaben in Rollen/Dienst-Netzen effizient zu entscheiden.

Rollen/Dienst-Netze bilden die Grundlage für die Interaktion der SONAR-Agenten. Die Prozess-Semantik der Petrinetze impliziert, welche Teams sich formieren können und wie sich die Plangenerierung im Team vollzieht. Der formale Teamplanungsprozess ist – in Anlehnung an die Agentenarchitektur aus Abb. 10.9 – in Abbildung 10.11 zusammengefasst.

Der Formalismus erlaubte es uns darüberhinaus, Kriterien der Wohlgeformtheit für Teamstrukturen zu entwickeln. Für Rollen/Dienst-Netze bedeutet Wohlgeformtheit, dass die Dienstnetzanschriften der Transitionen zu den Rollenanschriften der Stellen passen. Neben diesem statischen Begriff der Wohlgeformtheit haben wir auch einen Begriff der Wohlgeformtheit des Teamplanungspro-

zesse entwickelt, der beschreibt, dass die lokalen Pläne der Agenten konsistent mit der Plangenerierung im Team sind.

Betrachten wir im folgenden Kapitel mit Organisationen einen Erzeugungsmechanismus für Teamnetze.

11 Formale Agentenorganisationen

Das SONAR-Multiagentensystem als Organisationsform besteht aus einer formalen Organisation und ihren Mitgliedern, d.h. den der Organisation zugeordneten Akteuren. Unter einer Organisation verstehen wir hier eine formalisierte Institution, die sich zudem durch die formale Regelung der Mitgliedschaft kennzeichnet.[1] Der Organisationsbegriff ist also weiter gefasst als der betriebliche. Die Betrachtungsweise von Multiagentensystemen durch den Blick der Organisationstheorie hat einen eigenen Forschungsbereich innerhalb der VKI hervorgebracht: den der *Computational Organsisation Theory* (für eine Einführung siehe Prietula u. a., 1998; Carley und Gasser, 1999). Wir gliedern uns in diese Forschungsrichtung ein und betrachten in diesem Kapitel – aufbauend auf (Köhler, 2007; Köhler-Bußmeier u. a., 2009) – zunächst die *formale* Organisation. Kapitel 13 widmet sich dann der Verbindung von formaler Organisation und Mitgliedern zur informellen Organisation.

Eine Organisation wird in Hinblick auf ein Designziel konstruiert.[2] Das Organisationsdesign hat den Zweck, in Abhängigkeit der vorliegenden Aufgaben und der zur Verfügung stehenden Technologie die Organisationsstrukturen (Netzwerk der Organisationseinheiten, Rolle etc.) zu definieren. Die Wahl betrifft sowohl die Typisierung als auch die Interaktivitäten. Die Wahl der Organisationsstrukturen hat Auswirkungen darauf, wie effektiv oder effizient die Agenten Aufgaben – in Form von Aktivitäten – bearbeiten.

Zur organisationalen Kernaktivität zählen wir nur die Elemente der formalen Organisation, d.h. das Netzwerk, die Positionen, die Ressourcen, die Rollen und die Aktivitäten (vgl. dazu auch Abbildung 3.8). An dieser Stelle spielen Akteure – als System(binnen)umwelt – und ihre Fähigkeiten noch keine Rolle. Wir geben im folgenden ein Modell an, in dem sich alle Modellelemente (Positionen, Aktivitäten, Rollen, Netzwerk usw.) einfügen und zeigen, wie man diese zur Generierung von Multiagentensystemen nutzen kann.

11.1 Organisationspetrinetze und Positionen

Die Elemente der formalisierten Organisation sind die *Positionen*. Zentrales Konzept der Organisation ist das Organisationsnetzwerk, welches die Anordnung der Positionen definiert (vgl. auch zur Mühlen, 1999): Positionen stehen

[1] Die Verbindung von Organisationstheorie und Multiagentensystemen reicht jedoch noch weiter zurück. Bereits Müller (1993) geht von dem VKI-Konzept der *organisationellen Intelligenz* aus. Diese Verbindung wurde später auch unter dem Begriff der *MAS-Organisation* geführt (siehe auch Ferber u. a., 2003; Boissier u. a., 2005; Horling und Lesser, 2005a).

[2] Von diesem Designziel kann sich die Organisation aber unter Umständen im Laufe ihrer Evolution wieder entfernen – eine zentrale Erkenntnis des Neo-Institutionalismus.

in Verbindung mit anderen Positionen. Neben den aus dem betrieblichen Kontext bekannten Organisationsstrukturen – wie der Hierarchie, dem Stab oder der Matrix – existiert eine Vielzahl von Strukturen, die im Kontext der Graphentheorie, des Hardwareentwurfs oder der verteilten Algorithmen studiert wurden. Beispiele sind hier die für Betriebe eher untypischen Stukturen des Kreises, des Hypercubes, des Butterfly-Netzwerkes usw.

Die Beziehungen zwischen den Postionen werden durch die *Verfahren* definiert. Verfahren regeln reflexiv die Mitgliedschaft von Akteuren und ihre Rollen in der Organisation, sie koordinieren die Interaktionen der Akteure miteinander, sie regeln die Modifikation von Verfahren. Durch Verfahren ist also sowohl die Statik als auch die die Dynamik einer Organisation geregelt.

Jeder formale Organisation lässt sich ein spezielles R/D Netz definieren: Jedes *Rolle* wird durch eine Stelle modelliert, jede *Tätigkeit* durch eine Transition. Jede Transition t besitzt genau eine Stelle im Vorbereich. Eine (t,p)-Kante bedeutet, dass die Tätigkeit t die Rolle p *nutzt*. Eine (p,t)-Kante bedeutet, dass die mit p verbundenen Rollenaufgaben durch die Tätigkeit t *implementiert* werden. Eine Marke auf der Stelle p stellt einen Arbeitsauftrag dar, der von einer Tätigkeit $t \in {}^\bullet p$ generiert wurde und der von einer Tätigkeit $t \in p^\bullet$ bearbeitet werden muss.

Für Organisationen gruppieren wir Teilmengen von Stellen und Transitionen zu organisationalen Positionen: $O \subseteq P \cup T$. Auf diese Art und Weise erhalten wir eine Partionierung $\mathcal{O}$ der Knotenmenge $P \cup T$. Da $\mathcal{O}$ eine Partition der Menge $P \cup T$ ist, existiert zu jeder Position $p \in P$ genau eine Position $O \in \mathcal{O}$, die wir mit $O(p)$ bezeichnen. Genauso existiert zu jeder Tätigkeit $t \in T$ genau eine Position $O \in \mathcal{O}$, die wir mit $O(t)$ bezeichnen. Wir fordern die folgende Zusammenhangsbedingung: Wenn eine Transition t zu einer Position O gehört, dann gehören alle genutzten Rollen im Nachbereich $p \in t^\bullet$ ebenfalls zur Position: $t \in O \Longrightarrow t^\bullet \subseteq O$. Gehört p zu einer Position, so sind alle zugreifenden Dienste $t \in {}^\bullet p$ auch Element dieser Position: $p \in O \Longrightarrow {}^\bullet p \subseteq O$. Alle (t,p)-Kanten verlaufen daher immer innerhalb derselben Position. Die eine Rolle implementierenden Dienste $t \in p^\bullet$ können, müssen aber nicht zur gleichen Rolle gehören. Mit anderen Worten: Kanten, die verschiedene Positionen verbinden, sind stets von der Form $(p,t) \in P \times T$.

Eine Organisation ist ein R/D-Netz (vgl. Definition 10.8) mit einer Organisationsstruktur. Eine Organisation weist jedem Stelle p einer Position O im Organisationsnetz ein Rollenprofil $R(t)$ und jeder Transition t ein Dienstnetz $D(t)$ zu: Das Rollenprofil, die eine Positionsstelle p auszufüllen hat, ist durch die Anschrift $R(p)$ gegeben. Das zu einer Transition t zugehörige Dienstnetz ist durch die Anschrift $D(t)$ definiert. Abbildung 11.1 zeigt eine Organisationsnetz, bei dem die Dienstnetze und die Rollenprofile bereits als Anschriften enthalten sind. Analog zu Teams weisen wir jeder Transition t eine Prozessformel $\psi(t)$ zu, die eine Menge zugelassener Prozesse ihres Dienstnetzens $D(t)$ beschreibt.

Definition 11.1 *Sei $N = (P,T,F)$ ein P/T-Netz. Eine Partitionierung $\mathcal{O}$ auf der Knotenmenge $P \cup T$ ist eine* Organisationsstruktur*, wenn folgende Zusammenhangsbedingung erfüllt ist:*

$$\forall (x,y) \in F : O(x) \neq O(y) \Longrightarrow (x,y) \in P \times T$$

Ein Element $O \in \mathcal{O}$ heißt Position *der Organisation.*

Ein Organisationsnetz $(N, \mathcal{O})$ *besteht aus einer Organisationsstruktur $\mathcal{O}$ zum Netz N.*

Sei eine Rollenmenge $\mathcal{R}$ und eine Dienstklasse $\mathcal{D}$ gegeben. Eine Organisation

$$Org = (N, \mathcal{O}, R, D),$$

besteht aus dem Organisationsnetz $(N, \mathcal{O})$ und dem R/D-Netz (N, R, D).

Eine Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D)$ heißt wohlgeformt*, wenn das R/D-Netz (N, R, D) dies ist.*

Eine koordinierende Organisation *ist das Paar (Org, ψ), wobei $\psi : T \to PF_{\mathcal{D}}$ die zugelassenen Prozesse der Organisation Org definiert, wobei $\forall t \in T : Proc(D(t), \psi(t)) \neq \emptyset$ gelten muss.*

Koordinierende Organisationen notieren wir auch in der Form $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$. Definieren wir $\psi(t) = \text{true}$, so erkennen wir, dass koordinierende Organisationen eine konservative Erweiterung der Organisation darstellen. Besteht keine Gefahr der Verwechslung, so sprechen wir auch im Falle koordinierender Organisationen nur von Organisationen.

Theorem 11.2 *Sei $\mathcal{O}$ eine Organisationsstruktur.*

- *Jede Position $O \in \mathcal{O}$, die keine Tätigkeiten besitzt, wird von keiner Position genutzt: $\forall O \in \mathcal{O} : O \subseteq P \Longrightarrow {}^\bullet O = \emptyset$.*
- *Jede Position $O \in \mathcal{O}$, die keine Rollenprofile enthält, kann keine anderen Position nutzen: $\forall O \in \mathcal{O} : O \subseteq T \Longrightarrow O^\bullet = \emptyset$.*

Beweis: Sei $O \subseteq P$ und $O \in \mathcal{O}$. Aus der Definition folgt für alle $p \in O \cap P$, dass ${}^\bullet p \subseteq O$ gelten muss. Da aber stets ${}^\bullet p \subseteq T$ gilt, folgt daher ${}^\bullet p = \emptyset$. Analog für $O \subseteq T$. q.e.d.

Eine Position $O \in \mathcal{O}$ mit $O \subseteq P$ heißt *initial*, denn diese Position startet eine Tätigkeit, ohne dass eine andere Positionen auf sie zurückgriffe. Eine Position $O \in \mathcal{O}$ mit $O \subseteq T$ heißt *terminal*, denn diese Position greift auf keine anderen Positionen zurück. Eine Position $O \in \mathcal{O}$ mit $O \subseteq P$ oder $O \subseteq T$ heißt *elementare* Position. Eine Position $O \in \mathcal{O}$ mit $O \cap P \neq \emptyset$ und $O \cap T \neq \emptyset$ modelliert dagegen eine *komplexe* Position, die auf andere Positionen zurückgreift.

Beispiel Abbildung 11.1 zeigt ein Organisationsnetz. Das der Organisation zugrundeliegende R/D-Netz ist mit dem in Abbildung 10.4 dargestellten Netz identisch. Die Menge der Positionen ist durch die Organisationstruktur $\mathcal{O} = \{O_0, \ldots, O_8\}$ gegeben, wobei die Elemente der Partition gegeben sind durch:

O_0	=	$\{p_0\}$	O_3	=	$\{t_3, t_4, t_5, p_5, p_6, p_7\}$	O_6	=	$\{t_9\}$
O_1	=	$\{t_1, p_1, p_2\}$	O_4	=	$\{t_6, t_7\}$	O_7	=	$\{t_{10}\}$
O_2	=	$\{t_2, p_3, p_4\}$	O_5	=	$\{t_8\}$	O_8	=	$\{t_{11}\}$

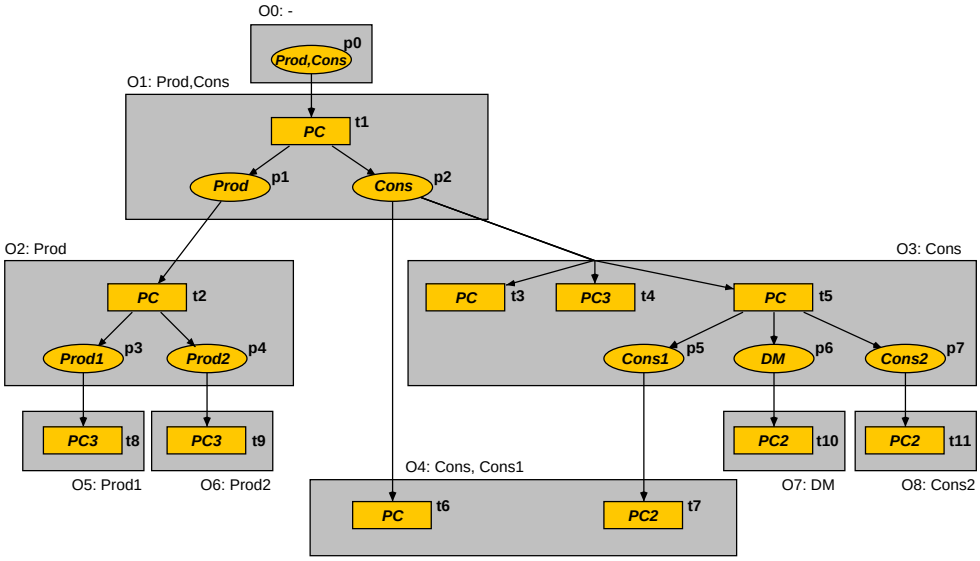


Abbildung 11.1: Organisationsnetz

Positionen, die mehr als einen Knoten umfassen, sind durch graue Kästen dargestellt. Die Positionen $O_1, \ldots, O_4$ sind komplex. Die Position O_0 ist eine reine Stellenmenge, stellt also eine Aktivierungsbedingung dar. Die Positionen $O_5, \ldots, O_8$ sind reine Transitionsmengen, sind also elementare Positionen. In O_3 können die Tätigkeiten t_3, t_4 und t_5 alternativ genutzt werden, um die Aufgabe p_2 zu realisieren.

Abbildung 11.1 ist dabei natürlich weder das einzig mögliche, noch unter den zum R/D-Netz aus Abbildung 10.4 passenden Organisationsnetzen ein besonders ausgezeichnetes. Eine ebenso mögliche Alternative, die sogar Zyklen enthält, ist in Abbildung 11.2 dargestellt.

In dem Modell aus Abbildung 11.1 wird die Rolle *DecisionMaker* (*DM*) von p_6 implementiert, indem O_3 die Entscheidung an die Position O_7 delegiert. Es wäre ebenso möglich, die Positionen O_3 und O_7 zusammenzufassen, damit der delegierende Agent mit dem Agenten identisch ist, der die Rolle *DecisionMaker* implementiert. Dies gilt ganz allgemein für alle Positionen, die aus nur einer Transition bestehen. ◇

Das folgende Lemma besagt, dass es zu praktisch jedem Netz mindestens eine Organisationsstruktur gibt.

Lemma 11.3 *Sei $N = (P, T, F)$ ein Netz. Ist N schlingenfrei, dann existiert eine Organisationsstruktur $\mathcal{O}$.*

Beweis: Für ein Netz N mit Schlingen ist es nicht möglich, eine Organisationsstruktur anzugeben, da jeder Zyklus $pFtFp$ die Zusammenhangsbedingung verletzt.

Zu jedem schlingenfreien Netz können wir eine Organisationsstruktur definieren: Zu jeder Transition t betrachten wir die Menge der Knoten p_i und t_i, die

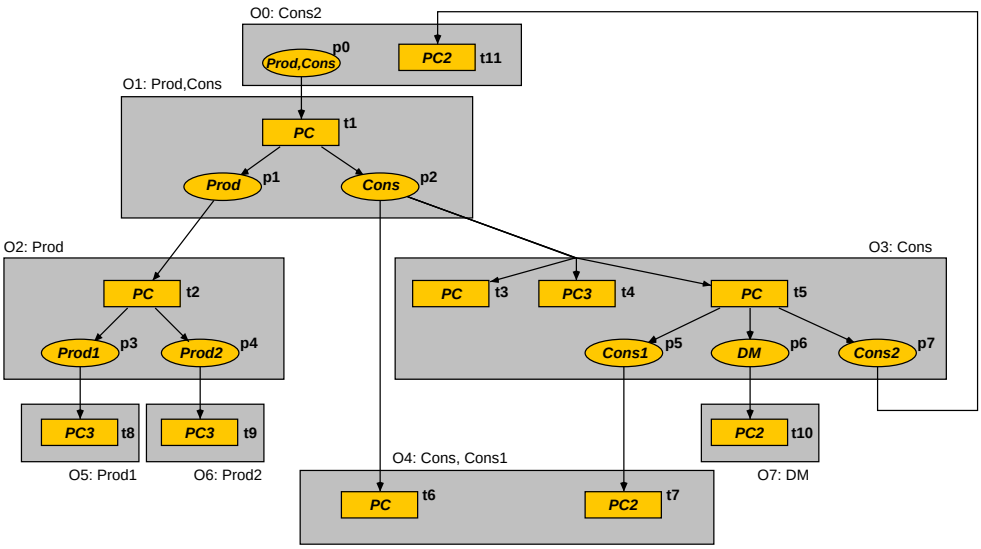


Abbildung 11.2: Alternatives Organisationsnetz

wir zu einer Position O hinzunehmen müssen, um die Zusammenhangsbedingung nicht zu verletzen:

$$\{p_i, t_i \mid tFp_1F^{-1}t_1Fp_2F^{-1}t_2Fp_3 \ldots\}$$

Analog setzen wir für einen Platz p die Knoten $\{p_i, t_i \mid pF^{-1}t_1Fp_1F^{-1}t_2 \ldots\}$ in Beziehung. Dies können wir durch eine einzige Relation ausdrücken.

$$\sim \quad := \quad \begin{pmatrix} \big((F \circ F^{-1})^* \cup (F \circ F^{-1})^* \circ F\big) & \cap & \big(T \times (P \cup T)\big) \end{pmatrix} \cup \begin{pmatrix} \big((F^{-1} \circ F)^* \cup (F^{-1} \circ F)^* \circ F^{-1}\big) & \cap & \big(P \times (P \cup T)\big) \end{pmatrix}$$

Man sieht leicht, dass $\sim$ eine Äquivalenzrelation auf den Netzknoten darstellt, also eine Partition $\mathcal{O}$ erzeugt. q.e.d.

11.1.1 Typische Organisationformen

Ein Markt ist Abbildung 11.3 dargestellt, ein Koalition in Abbildung 11.4 und eine virtuelle Organisation in Abbildung 11.5. Die Netze heben jeweils schön die spezifischen Eigenschaften der Organisationsformen heraus.

Der Markt in Abb. 11.3 zeichnet sich durch seine flache Struktur aus, es findet also kaum iterierte Delegation statt. Außerdem strukturiert der Markt genau eine Rollenbeziehung, nämlich die von Erzeuger und Verbraucher. Dafür ist der Verzweigungsgrad sehr hoch, da es viele Marktteilnehmer gibt. Alle entstehenden Teams sind also – gemessen an der Tiefe der Graphenstruktur – sehr flach. Die Anzahl der generierbaren Team, die ja mit dem Alternativgrad wächst, ist dagegen sehr groß.

Die Koalition in Abb. 11.4 zeichnet sich dagegen durch eine geringere Anzahl an Mitgliedern, aber eine höhere Anzahl an Aktivitäten aus. Das Hauptaugen-

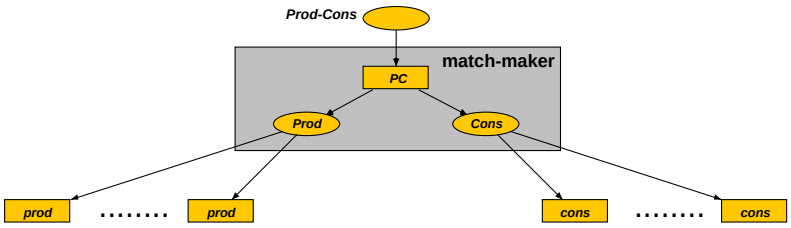


Abbildung 11.3: Ein Markt als Organisationsnetz

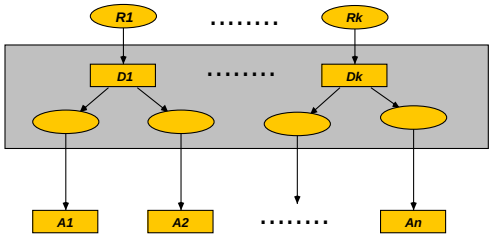


Abbildung 11.4: Eine Koalition als Organisationsnetz

merk liegt auf der Bündelung der verschiedenen Aktivitäten zu einem kohärentem Ganzen. Entsprechend hoch ist die Anzahl der Aufgaben und Rollen, die die Organisation bearbeiten kann. Für jede einzelne der Aufgaben ist die Anzahl der Bearbeitungsvarianten dagegen eher niedrig.

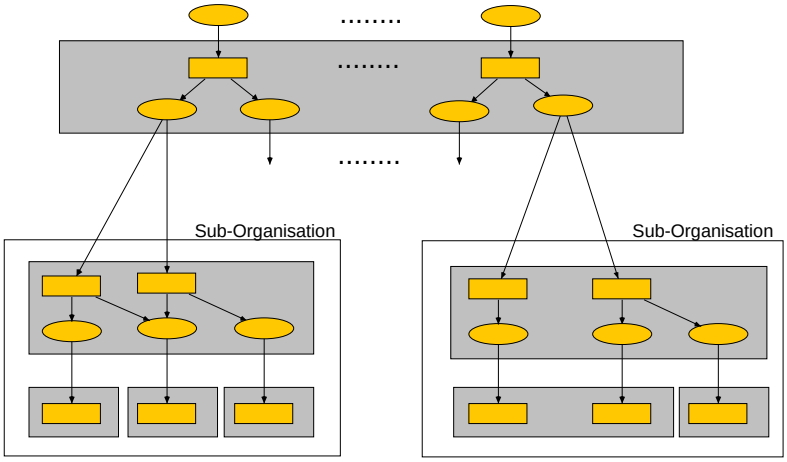


Abbildung 11.5: Eine virtuelle Organisation als Organisationsnetz

Die virtuelle Organisation aus Abb. 11.5 erweitert diesen Aspekt der Bündelung um den Aspekt der Tiefenstruktur. Dieser zeigt sich durch die größere Delegationstiefe der Aufgaben, die sich ergibt, weil sich in einer virtuelle Organisation bereits vorstrukturierte Suborganisation mit vielen Positionen, die weitläufiger verbunden sind, zusammenschließen.

11.1.2 Holonische Organisationsverbünde

Eine Organisation $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ besteht aus einem Netzwerk von Positionen: Faltet man alle Stellen und alle Transitionen einer Position $O \in \mathcal{O}$ zu einem Knoten, so erhält man einen Graphen, der das Organigramm der abstrakten Organisation darstellt.

Formal definieren wir das von der Organisation $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ erzeugte Organigramm als den gerichteten Graphen, der aus den Knoten $V = \mathcal{O}$ und den Kanten $V = \{(O(x), O(y)) \mid (x, y) \in F_N\}$ besteht. Dieser Graph ist im allgemeinen nicht zyklenfrei, wie man anhand des Organisationsnetzes in Abbildung 11.6 und seiner Vergröberung in Abbildung 11.7 erkennen kann.

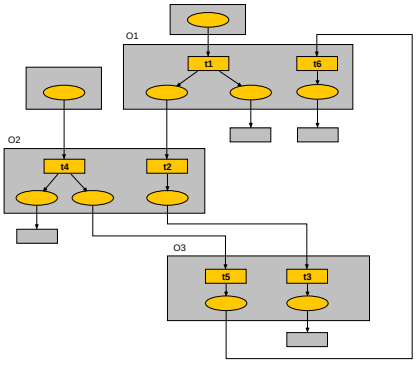


Abbildung 11.6: Organisation

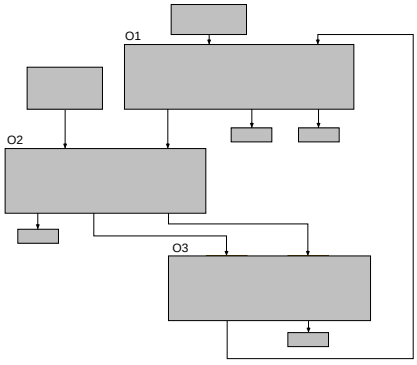


Abbildung 11.7: Vergröberung

Durch die Vergröberung werden durch die Kanten nur noch abstrakte Kommunikationsbeziehungen beschrieben, bei denen die jeweilige Tätigkeit und deren Abhängigkeiten ausgeblendet werden. Es ist offen, ob die Kommunikationsbeziehungen statisch, d.h. für alle Aktivitäten gleich sind, oder ob sie vom Aufgabenprofil abhängen.

In dem Organisationsnetz in Abbildung 11.6 existiert der Abhängigkeitspfad $t_1t_2t_3$, der eine Hierarchie der Positionen von O_1 über O_2 zu O_3 nahelegt. Diese Hierarchie deckt sich jedoch nicht mit der des Abhängigkeitspfade $t_4t_5t_6$ der von O_2 über O_3 zu O_1 verläuft. In betrieblichen Organisationsstrukturen ist es vorteilshaft, die Organisationsstrukturen (insbesondere die Weisungsstrukturen) für alle Aufgabenpfade identisch zu gestalten, um so einen aufwändigen Kontextwechsel der Delegationsbefugnisse zu vermeiden.

Die Zyklenfreiheit des Graphen erlaubt es, auf die Zyklenfreiheit der Tätigkeitspfade, bzw. ihre Endlichkeit zu schließen. Die Umkehrung gilt jedoch, wie wir gesehen haben, im allgemeinen jedoch nicht. Generell ist eine Modellierung einer Organisation, deren Organigramm bereits zyklenfrei sein muss, zu eingeschränkt. In diesem Fall ist es notwendig, die Tätigkeitspfade selbst zu analysieren.

Organigramme leisten darüberhinaus auch beim Entwurf des Multiagentensystems einen wichtigen Beitrag, denn wenn wir zum Organigramm einen aufspannenden Baum konstruieren, dann erhalten wir einen hierarchischen Namensraum, der geeignet ist, dass System auf verschiedene physikalische Rechner zu verteilen.

Bislang bestehen Organisationen aus einem Netzwerk der Positionen. Das Netzwerk weist dabei keine weitere Strukturierung auf. Im folgenden wollen wir verschachtelte Organisationen betrachten. Wir generalisieren Organisationsstrukturen, indem wir festlegen, dass eine Organisation sich entweder aus Positionen oder wiederum aus Organisationen zusammensetzt. Organisationen besitzen somit eine selbstähnliche, holonische Struktur.

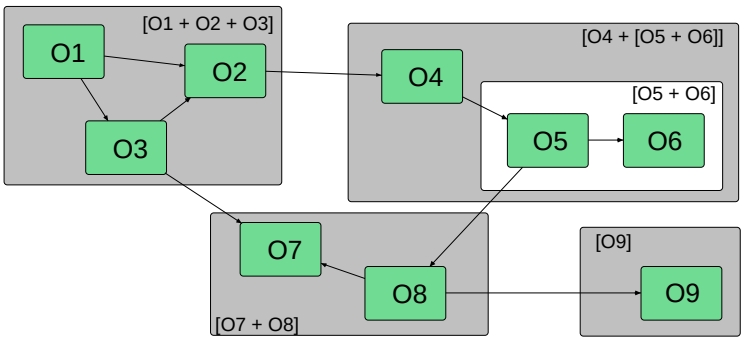


Abbildung 11.8: Holonische Organisation mit rekursivem Organigramm

Dieses rekursive Enthaltensein beschreiben wir durch eine verschachtelte Struktur. Beispielsweise besteht die Organisation in Abbildung 11.8 aus vier Suborganisationen: Die erste Suborganisationen besteht aus den Positionen O_1, O_2 sowie O_3 die zweite aus der Positionen O_4 und der aus O_5 und O_6 gebildeten Suborganisation, die dritte aus der Positionen O_7 und O_8 und die vierte nur aus der Position O_9. Diese Struktur notieren wir als verschachtelte Multimengen über $\mathcal{O}$:

$$\begin{aligned}
\nu &= \big[\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \nu_4\big] \\
&= \big[[O_1 + O_2 + O_3] \quad + \quad [O_4 + \nu_5] \quad + \quad [O_7 + O_8] \quad + \quad [O_9]\big] \\
&= \big[[O_1 + O_2 + O_3] \quad + \quad [O_4 + [O_5 + O_6]] \quad + \quad [O_7 + O_8] \quad + \quad [O_9]\big]
\end{aligned}$$

Die hier verwendeten verschachtelte Multimengen über einer beliebigen Domäne X ergeben sich induktiv durch die Verschachtelungsoperation $[\cdot]$ und die Addition $\cdot + \cdot$. Hierbei ist die Multimengenaddition $+$ wie üblich assoziativ und kommutativ und besitzt die leere Multimenge $\mathbf{0}$ als neutrales Element: Seien $x_1, \ldots, x_k$ Elemente aus X und $\nu_1, \ldots, \nu_l$ verschachtelte Multimengen, dann ist auch auch $[x_1 + \cdots + x_k + \nu_1 + \cdots + \nu_l]$ eine verschachtelte Multimenge. Hierbei sind auch $k = 0$ oder $l = 0$ möglich. Die entsprechenden Terme stellen dann die leere Multimenge dar. Die einfachste verschachtelte Multimenge ergibt sich für $l = 0$ und ist von der Form $[x_1 + \cdots + x_k]$. Dieser Term ist nicht weiter verschachtelt.[3] Diese Verschachtelten Multimengen haben stets ein äußeres Klammerpaar. Dies ist inhaltlich sinnvoll, da die Klammerung einen Systemabschluß darstellt und eine Organisation nach außen hin als Einheit auftritt.

[3] Wir lassen sogar $k = l = 0$ zu, d.h. auch Terme der Form $[\mathbf{0}]$. Dieser Term repräsentiert eine leere Suborganisation. In den meisten Fällen existiert für dieses Artefakt keine reale Entsprechung. Eine leere Suborganisation kann allerdings sehr wohl als Zwischenzustand auftreten, nämlich dann, wenn die Organisation restrukturiert wird.

In einer holonischen Organisation verwenden wir Suborganisationen dazu, um eine abstraktere Systemsicht einnehmen zu können. So können wir die Systemstruktur des obigen Beispiels auch abstrakter notieren:

$$\nu = \left[\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \nu_4\right]$$

Damit erkennen wir sofort, dass ν aus den Suborganisationen ν_1, ν_2, ν_3 und ν_4 besteht, ohne dass wir sofort auf deren inneren Aufbau eingehen müssten. Wir können auch nur einzelne Teilsysteme detailierter betrachten, beispielsweise ν_2:

$$\nu = \left[\nu_1 + [O_4 + [O_5 + O_6]] + \nu_3 + \nu_4\right]$$

Verschachtelte Multimengen ν über $\mathcal{O}$ beschreiben die gesamte Organisationsstruktur und jeder Subterm der Form $[O_1 + \cdots \nu_l]$ beschreibt eine Suborganisation. Geklammerte Subterme bezeichnen wir daher auch als Suborganisationen. Die Menge aller Suborganisationen ergibt sich formal folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \mathit{Suborg}(\nu) := \quad & \{\nu\} \cup \mathit{Suborg}(\nu_1) \cup \ldots \cup \mathit{Suborg}(\nu_l) \\ & \text{für } \nu = [O_1 + \cdots + O_k + \nu_1 + \cdots + \nu_l] \end{aligned} \tag{11.1}$$

Nach dieser Definition ist insbesondere ν Suborganisation von sich selbst. Im folgenden identifzieren wir die Organisation, die sich aus Suborganisationen $\nu_1, \ldots, \nu_l$ zusammensetzt, mit der Multimenge, die sie beschreibt – also mit $[O_1 + \cdots + \nu_l]$.

Im einfachsten Fall besitzt die Organisationstruktur keine weitere Aggregation von Positionen. Alle Positionen befinden sich daher auf einer Ebene, d.h. die Organisation besitzt eine „flache“ Struktur:

$$\nu_{\mathit{flat}}(\mathcal{O}) = \left[\sum_{O \in \mathcal{O}} O\right] \tag{11.2}$$

Sei ν eine verschachtelte Multimenge über $\mathcal{O}$. Damit ν eine verschachtelte Organisationstruktur beschreibt, müssen alle Positionen $O \in \mathcal{O}$ enthalten sein. Die enthaltenen Elemente berechnen wir, indem wir die Verschachtelungsstruktur auflösen. Diese „flache“ Variante einer verschachtelten Multimenge erhalten wir durch die Abbildung fl:

$$\mathit{fl}([x_1 + \cdots + x_k + \nu_1 + \cdots + \nu_l]) \quad = \quad x_1 + \cdots + x_k + \mathit{fl}(\nu_1) + \cdots + \mathit{fl}(\nu_l) \tag{11.3}$$

Formal lässt sich das Enthaltensein aller Positionen nun durch die Forderung ausdrücken, dass alle Positionen O im Träger der flachen Variante von ν vorkommen:

$$\mathrm{dom}(\mathit{fl}(\nu)) = \mathcal{O}$$

Eine holonische Organisation ist eine Organisation, zu deren Positionsstruktur $\mathcal{O}$ eine verschachtelte Multimengen ν die holonische Struktur definiert.

Definition 11.4 *Eine* holonische Organisation *ist das Tupel*

$$\mathit{Org} = (N, \nu, R, D),$$

wenn $(N, \mathcal{O}_\nu, R, D)$ *für* $\mathcal{O}_\nu := \mathit{dom}(\mathit{fl}(\nu))$ *eine Organisation ist.*

Die Menge aller Suborganisationen einer holonischen Organisation $Org = (N, \nu, R, D)$ ist die Menge:

$$Suborg(Org) := Suborg(\nu)$$

Holonische Organisationen sind spezifischer als Organisationen. Im folgenden können wir somit überall da, wo eine Organisation benötigt wird, auch eine holonische Organisation verwenden, d.h. wir werden auch (N, ν, R, D) notieren, wenn eigentlich $(N, \mathrm{dom}(\mathit{fl}(\nu)), R, D)$ gemeint ist. Umgekehrt können wir, wenn nichts anderes angegeben ist, jede Organisation mit einer „flache“ Struktur versehen, d.h. wir notieren auch $(N, \mathcal{O}, R, D)$ für die holonische Organisation $(N, \nu_{\mathit{flat}}(\mathcal{O}), R, D)$.

Im Allgemeinfall ist es für eine holonische Organisation möglich, dass dieselbe Position gleichzeitig in mehreren verschachtelten Suborganisationen vorkommt. Wollen wir mit ν eine Organisation beschreiben, in der jede Position O an genau einem Ort der Hierarchie vorkommt, so betrachten wir *strikte* Strukturen. Dies können wir durch die folgende Bedingung ausdrücken:

$$\forall O \in \mathcal{O} : \mathit{fl}(\nu)(O) \leq 1$$

In diesem Fall ist $\mathit{fl}(\nu)$ also eine Menge, d.h. $\mathit{fl}(\nu) = \mathrm{dom}(\mathit{fl}(\nu))$. Fordern wir diese Eigenschaft nicht, so erhalten wir holonische Organisationen, die keine exklusive Aggregation der Teile fordern.

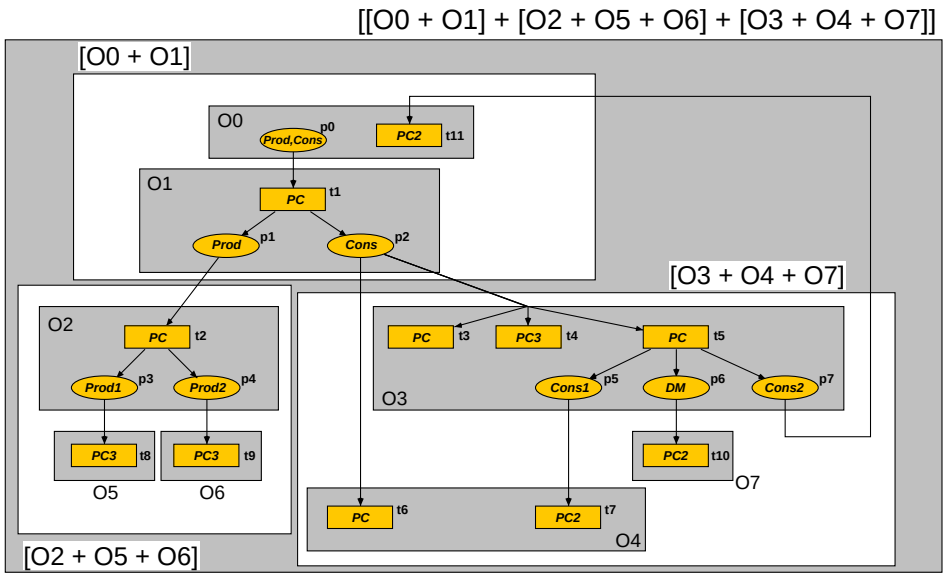


Abbildung 11.9: Holononische Positionen

Wir fassen Suborganisationen als spezielle Positionen auf, sogenannte *holonische Positionen*. Die interne Struktur dieser holonischen Organisationen ergibt sich hierbei aus den aggregierten Positionen (vgl. Abbildung 11.9, die eine holonische Struktur für die Organisation aus Abbildung 11.2 darstellt). Sei $Org = (N, \nu, R, D)$ eine holonische Organisation und $\nu' \in Suborg(Org)$ eine

beliebige Suborganisation, dann ergibt sich die durch ν' generierte Position als Vereinigung aller in ν' enthaltenen Positionen, genauer aller Plätze und Transitionen, die diese Positionen charakterisieren:

$$O(\nu) := \bigcup \mathrm{dom}(\mathit{fl}(\nu)) \tag{11.4}$$

Holonische Positionen präsentieren nach außen ihre Suborganisation als eine Einheit und dienen nach innen als Plattform für ihre Suborganisationen. Auf diese Art und Weise können wir das Strukturierungsmerkmal der Hierarchie auch in der Implementation direkt verwenden. Ein Vorteil dieser Kapselung besteht darin, die Reichweite von Reorganisationsprozessen auf Suborganisationen zu begrenzen. In einer holonischen Organisation erhalten wir insgesamt somit die folgenden Positionen:

$$\mathcal{O}^{\nu} := \mathcal{O} \cup \{O(\nu) \mid \nu \in \mathit{Suborg}(\mathit{Org})\}$$

In einer praktischen Umsetzung einer holonischen Organisation werden nicht nur die „normalen“ Positionen durch Agenten repräsentiert, sondern auch die holonischen Positionen, d.h. die Suborganisationen. In der Struktur

$$\nu = \big[[O_1 + O_2 + O_3] \quad + \quad [O_4 + [O_5 + O_6]] \quad + \quad [O_7 + O_8] \quad + \quad [O_9]\big]$$

aus dem Beispiel in Abbildung 11.8 haben wir neben den neun Positionsagenten noch sechs Agenten für die holonischen Positionen der Suborganisation $\nu_1 = [O_1 + O_2 + O_3]$, $\nu_2 = [O_4 + \nu_5]$, $\nu_3 = [O_7 + O_8]$, $\nu_4 = [O_9]$, $\nu_5 = [O_5 + O_6]$ und für ν selbst.

Die holonische Positionen $O(\nu)$ besitzen als Aggregat einen sehr komplexen inneren Aufbau. Im allgemeinen ist es aber nicht sinnvoll, alle internen Details auf allen Beschreibungsebenen zu präsentieren. Im folgenden Abschnitt betrachten wir daher die Vergröberung von Positionen, so dass wir von irrelevanten Details abstrahieren können.

11.1.3 Verfeinerung und Vergröberung

Wir wollen nun betrachten, wie sich die holonische Struktur mit den Tätigkeitspfaden verträgt. Eine Hierarchie von Organisationen entsteht, wenn eine Position durch eine komplette Organisation verfeinert wird. Eine solche Verfeinerung von Organisationen können wir äquivalent als Vergöberung ausdrücken, indem wir umgekehrt eine Menge $\mathcal{Q} \subseteq \mathcal{O}$ von Positionen zu einer Position $O_{\mathcal{Q}}$, die aus einer einzigen Transition besteht, vergröbern. Diese neue Transition bezeichnen wir mit $t_{\mathcal{Q}}$.

Damit das Ergebnis der Konstruktion wieder ein R/D-Netz ist, muss die neue Transition $t_{(P_{\mathcal{Q}}{}^{\bullet} \setminus \bigcup \mathcal{Q})}$ wiederum genau eine Stelle im Vorbereich besitzt. Daher ist es wichtig, dass die Tätigkeiten am Rand mit genau einer Stelle verbunden sind: $|{}^{\bullet}T_{\mathcal{Q}} \setminus \bigcup \mathcal{Q}| = 1$.

Analog können wir anhand der Positionsmenge $\mathcal{Q}$ eine Suborganisations definieren, indem wir uns auf alle Netzknoten aus $\mathcal{Q}$ sowie die im Rand ${}^{\bullet}T_{\mathcal{Q}} \setminus \bigcup \mathcal{Q}$ davor liegenden Stellen beschränken. Letztere benötigen wir, um der Suborganisation von außen Aufgaben zuweisen zu können.

Definition 11.5 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ eine Organisation. Die Position-Menge $\mathcal{Q} \subseteq \mathcal{O}$ heißt* semi-abgeschlossen*, falls mit $P_\mathcal{Q} := P \cap \bigcup \mathcal{Q}$ und $T_\mathcal{Q} := T \cap \bigcup \mathcal{Q}$ gilt:*

1. *Alle Rollenprofile werden nur lokal genutzt: $|P_\mathcal{Q}{}^\bullet \setminus \bigcup \mathcal{Q}| = 0$*
2. *Die Tätigkeiten am Rand werden exklusiv genutzt: $|{}^\bullet T_\mathcal{Q} \setminus \bigcup \mathcal{Q}| = 1$*

Sei $\mathcal{Q} \subseteq \mathcal{O}$ semi-abgeschlossen, dann ist die Suborganisation *von Org bezüglich $\mathcal{Q}$ folgendermaßen definiert:*

$$Org_{\downarrow\mathcal{Q}} = (N_{\downarrow\mathcal{Q}}, \mathcal{O}_{\downarrow\mathcal{Q}}, R_{\downarrow\mathcal{Q}}, D_{\downarrow\mathcal{Q}})$$

mit $N_{\downarrow\mathcal{Q}} = (P_{\downarrow\mathcal{Q}}, T_{\downarrow\mathcal{Q}}, F_{\downarrow\mathcal{Q}})$ und:

$$\begin{aligned}
P_{\downarrow\mathcal{Q}} &= P_\mathcal{Q} \cup {}^\bullet T_\mathcal{Q} \\
T_{\downarrow\mathcal{Q}} &= T_\mathcal{Q} \\
F_{\downarrow\mathcal{Q}} &= \Big(F \cap ((T_{\downarrow\mathcal{Q}} \times P_{\downarrow\mathcal{Q}}) \cup (P_{\downarrow\mathcal{Q}} \times T_{\downarrow\mathcal{Q}}))\Big) \\
\mathcal{O}_{\downarrow\mathcal{Q}} &= \mathcal{Q} \cup \Big\{{}^\bullet T_\mathcal{Q} \setminus \bigcup \mathcal{Q}\Big\} \\
R_{\downarrow\mathcal{Q}} &= R|_{P_{\downarrow\mathcal{Q}}} \\
D_{\downarrow\mathcal{Q}} &= D|_{T_{\downarrow\mathcal{Q}}}
\end{aligned}$$

Sei $\mathcal{Q} \subseteq \mathcal{O}$ semi-abgeschlossen, dann ist die Vergröberung *von Org bezüglich $\mathcal{Q}$ die Organisation*

$$Org_{/\mathcal{Q}} = (N_{/\mathcal{Q}}, \mathcal{O}_{/\mathcal{Q}}, R_{/\mathcal{Q}}, D_{/\mathcal{Q}})$$

mit $N_{/\mathcal{Q}} = (P_{/\mathcal{Q}}, T_{/\mathcal{Q}}, F_{/\mathcal{Q}})$ und:

$$\begin{aligned}
P_{/\mathcal{Q}} &= P \setminus \bigcup \mathcal{Q} \\
T_{/\mathcal{Q}} &= \Big(T \setminus \bigcup \mathcal{Q}\Big) \uplus \{t_\mathcal{Q}\} \\
F_{/\mathcal{Q}} &= \Big(F \cap \big((T_{/\mathcal{Q}} \times P_{/\mathcal{Q}}) \cup (P_{/\mathcal{Q}} \times T_{/\mathcal{Q}})\big)\Big) \cup \Big(({}^\bullet T_\mathcal{Q} \setminus \bigcup \mathcal{Q}) \times \{t_\mathcal{Q}\}\Big) \\
\mathcal{O}_{/\mathcal{Q}} &= (\mathcal{O} \setminus \mathcal{Q}) \cup \{O_\mathcal{Q}\} \quad \textit{mit} \quad O_\mathcal{Q} = \{t_\mathcal{Q}\} \\
R_{/\mathcal{Q}} &= R|_{P_{/\mathcal{Q}}} \\
D_{/\mathcal{Q}} &= D|_{T_{/\mathcal{Q}}} \cup \{(t_\mathcal{Q}, D(t)\} \quad \textit{für irgendein} \quad t \in T_\mathcal{Q} \setminus \bigcup \mathcal{Q}
\end{aligned}$$

Die in $\mathcal{O}_{\downarrow\mathcal{Q}}$ hinzugefügte Position $\{{}^\bullet T_\mathcal{Q} \setminus \bigcup \mathcal{Q}\}$ bezeichnen wir als Kopf *(engl. head) von $\mathcal{Q}$, notiert als $O_{head}(\mathcal{Q})$.*

Die in $\mathcal{O}_{/\mathcal{Q}}$ hinzugefügte Position $O_\mathcal{Q}$ bezeichnen wir als Stellvertreter *(engl. proxy) von $\mathcal{Q}$, notiert als $O_{proxy}(\mathcal{Q})$.*

Wenn $Org_{/\mathcal{Q}}$ eine Vergröberung von Org, dann nennen wir Org eine Verfeinerung *von $Org_{/\mathcal{Q}}$ durch $\mathcal{Q}$.*

Die semi-abgeschlosse Position-Menge $\mathcal{Q} = \{O_3, O_4, O_5, O_6\}$ aus Abbildung 11.10 kann zu einer einzigen Position $O_\mathcal{Q} = \{t_\mathcal{Q}\}$ vergröbert werden. Diese

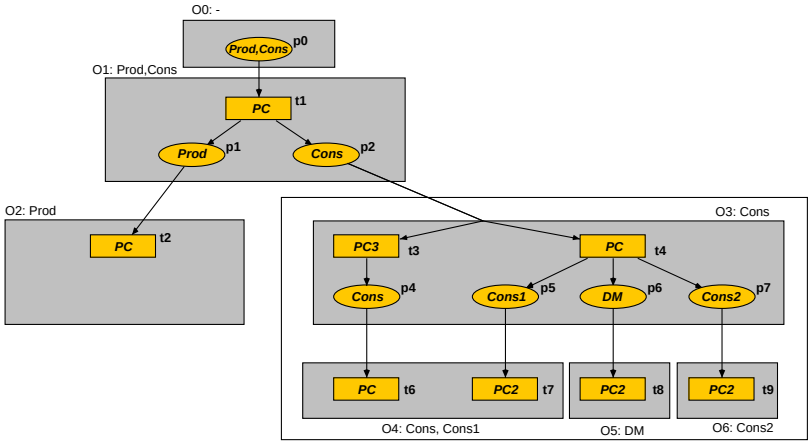


Abbildung 11.10: Organisation des Producer/Consumer-Systems

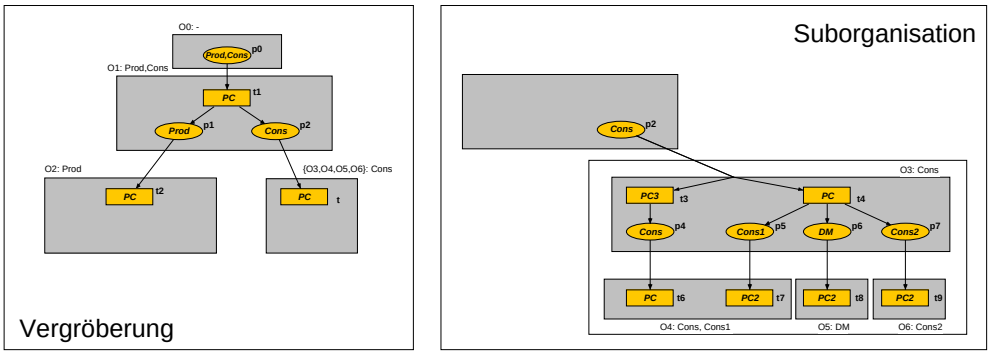


Abbildung 11.11: Vergröberung und Suborganisation zu Abb. 11.10

enthält nur die Transition $t_{\mathcal{Q}}$ und realisiert die Rolle $R(O_{\mathcal{Q}}) = \{Cons\}$. Die Auftrennung von Vergröberung und Suborganisation in Sinne einer holonischen Hierarchie mit *head* und *proxy* zeigt Abbildung 11.11.

Sei *Org* eine Organisation. Wird eine semi-abgeschlosse Position-Menge $\mathcal{Q}$ zu einer einzigen Position vergröbert, so sind Aufgaben von der resultierenden Organisation $Org_{/\mathcal{Q}}$ bearbeitbar, wenn es die verfeinerte ist.

Analog ergibt die Verfeinerung eines sicher-berarbeitbares Netz $Org_{/\mathcal{Q}}$ durch ein semi-abgeschlossenes, sicher-berarbeitbares Netz in Form der Suborganisation $Org_{\downarrow\mathcal{Q}}$ wiederum ein sicher-berarbeitbares Netz, nämlich *Org*.

Theorem 11.6 *Wenn $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ eine Organisation und $\mathcal{Q} \subseteq \mathcal{O}$ eine semi-abgeschlosse Positionsmenge ist, dann ist die Vergröberung $Org_{/\mathcal{Q}}$ und die Suborganisation $Org_{\downarrow\mathcal{Q}}$ genau dann sicher bearbeitbar, wenn es Org ist.*

Beweis: ($\Leftarrow$) Da $\mathcal{Q}$ semi-abgeschlossen ist, gilt $|{}^\bullet T_{\mathcal{Q}} \setminus \bigcup \mathcal{Q}| = 1$, d.h. der Rand wird exklusiv genutzt. Sei $p_{\mathcal{Q}}$ das Element im Rand ${}^\bullet T_{\mathcal{Q}} \setminus \bigcup \mathcal{Q}$. Sei *Org* sicher bearbeitbar, dann gilt für alle $m' \in RS(m)$ auch $\mathbf{0} \in RS(m')$. Dies gilt insbesondere für $m = {}^\bullet T_{\mathcal{Q}} \setminus \bigcup \mathcal{Q} = \{p_{\mathcal{Q}}\}$. Alle Stellen in $Org_{/\mathcal{Q}}$ sind dann auch bearbeitbar, denn alle Stellen in $P_{/\mathcal{Q}}$ sind bearbeitbar. Die Stelle $p_{\mathcal{Q}}$ wird durch die Transition $t_{\mathcal{Q}}$ geleert. Die anderen Stellen nutzen nur Transitionen aus $T_{/\mathcal{Q}}$.

Wenn *Org* sicher bearbeitbar, dann sind auch alle Stelle p markierbar, also auch alle aus $\mathcal{Q}$. Da $\mathcal{Q}$ semi-abgeschlossen ist, führt aber keine Kante mehr aus der Suborganisation heraus, so dass die Marken innerhalb von $\mathcal{Q}$ bearbeitet werden

($\Rightarrow$) Seien nun die Vergröberung $Org_{/\mathcal{Q}}$ und die Suborganisation $Org_{\downarrow\mathcal{Q}}$ sicher bearbeitbar.

Wenn $Org_{/\mathcal{Q}}$ sicher bearbeitbar ist, dann gilt für alle $m' \in RS(m)$ auch $\mathbf{0} \in RS(m')$. Wir zeigen, dass dann auch die sichere Bearbeitbarkeit in *Org* gilt.

Jede Transition in $Org_{/\mathcal{Q}}$, kann in *Org* direkt simuliert werden, da die Transitionen aus $Org_{/\mathcal{Q}}$ auch in *Org* enthalten sind.

Sei $p_{\mathcal{Q}}$ das Element in ${}^\bullet T_{\mathcal{Q}} \setminus \bigcup \mathcal{Q}$. Jede Marke der Stelle $p_{\mathcal{Q}}$ in $Org_{\downarrow\mathcal{Q}}$ kann in $Org_{\downarrow\mathcal{Q}}$ bearbeitet werden. Daher kann jedes Schalten von $t_{\mathcal{Q}}$, welches die Stelle $p_{\mathcal{Q}}$ in $Org_{/\mathcal{Q}}$ leert, durch eine Schaltfolge in $Org_{\downarrow\mathcal{Q}}$ und daher auch in *Org* simuliert werden. q.e.d.

Der Verfeinerungsoperator ist eng auf die Verschachtelung einer Organisationstruktur angepasst. Angenommen wir haben die Schachtelungsstruktur der Form:

$$\nu = [x_1 + \cdots + x_k + \nu_1 + \cdots + \nu_l]$$

Wir können dann direkt die vergröberte Sicht auf das System beschreiben, indem wir bezüglich aller ν_i rekursiv vergröbern. Formal betrachten wir also die Vergröberung der Organisation an der Klammerungsebene, die ν beschreibt, d.h. bezüglich der Positionsmenge $\mathcal{Q}(\nu) := \mathrm{dom}(\mathit{fl}(\nu_1 + \cdots + \nu_l))$:

$$Org(\nu) := Org_{/\mathcal{Q}(\nu)} \quad \text{mit} \quad \mathcal{Q}(\nu) := \mathrm{dom}(\mathit{fl}(\nu_1 + \cdots + \nu_l)) \tag{11.5}$$

Wir gehen hierbei davon aus $Org_{/\mathcal{Q}(\nu)}$ definiert ist, dass also $\mathcal{Q}(\nu)$ semi-abgeschlossen ist.

Jede Substruktur ν_i in ν erzeugt eine eigene Suborganisationen $Org(\nu, \nu_i)$, die aus den Positionen in ν_i, d.h. aus der Menge $\mathcal{Q}(\nu_i) := \mathrm{dom}(fl(\nu_i))$ bestehen:

$$Org(\nu, \nu_i) := Org_{\downarrow \mathcal{Q}(\nu_i)} \quad \text{mit} \quad \mathcal{Q}(\nu_i) := \mathrm{dom}(fl(\nu_i)) \tag{11.6}$$

Für jede dieser l Suborganisationen $Org(\nu, \nu_i)$ wenden wir das Verfahren nun rekursiv an. Auf diese Art und Weise generieren wir zu jeder verschachtelten Organisationstruktur ν eine Menge $ORG(Org, \nu)$ an vergröberten Teil-Organisationen.

Definition 11.7 *Die Menge der Teil-Organisationen, die eine verschachtelten Organisationstruktur ν aus der Organisation Org generiert, ist definiert als:*

$$ORGS(Org, \nu) := \{Org(\nu)\} \cup \bigcup_{i=1}^{l} ORGS(Org(\nu, \nu_i), \nu) \tag{11.7}$$

Für eine holonische Organisation $Org = (N, \nu, R, D)$ definieren wir dann speziell die Kurzschreibweise:

$$ORGS(Org) := ORGS(Org, \nu)$$

Das rekursive Berechnungsverfahren für $ORGS(Org, \nu)$ stoppt offensichtlich bei den Blättern, da dann $l = 0$ gilt.

Diese strukturierte Form der Verfeinerung ist ein mächtiges Hilfsmitttel für die Strukturierung eines Multiagentensystems. Wir können den Mechanismus jedoch nicht nur zum Organisationsdesign nutzen, sondern auch zudem noch flexibel als Transformation, die wir zur Laufzeit anwenden.

11.2 Koordinierung der Organisationsprozesse

Um nebenläufige Ereignisse nicht unnötig durch eine sequentielle Notation zu unterscheiden, betrachten wir die partiell geordneten Prozesse von Organisationsnetzen. Abbildung 11.12 zeigt einen Prozess der Organisation aus Abbildung 11.1 in der Markierung $m = p_0$.

Ist ein Organisationsnetz N gegeben, so lassen sich anhand eines gegebenen Team-Prozesses (K, ϕ) die Dienst- und Rollenabbildung D und R leicht angeben, indem man für alle $b \in B$ und $e \in E$ definiert:

$$R_G(b) = R(\phi(b)) \quad \text{und} \quad D_G(e) = D(\phi(b))$$

Jeder Prozess der Organisation erzeugt ein koordiniertes Team.

Theorem 11.8 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ eine Organisation und $R \in \mathcal{R}$ eine Rolle. Dann generiert jeder Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ zu einem $p \in Start_{Org}(R)$ das R/D-Netz:*

$$G_{Org}(K, \phi) := (K, (R \circ \phi), (D \circ \phi))$$

Sei (Org, ψ) eine koordinierende Organisation und $R \in \mathcal{R}$ eine Rolle. Für jedes $p \in Start_{Org}(R)$ erzeugt jeder Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ des Organisationsnetzes das koordinierende Team:

$$G_{(Org,\psi)}(K, \phi) := (K, (R \circ \phi), (D \circ \phi), (\psi \circ \phi_{|E}))$$

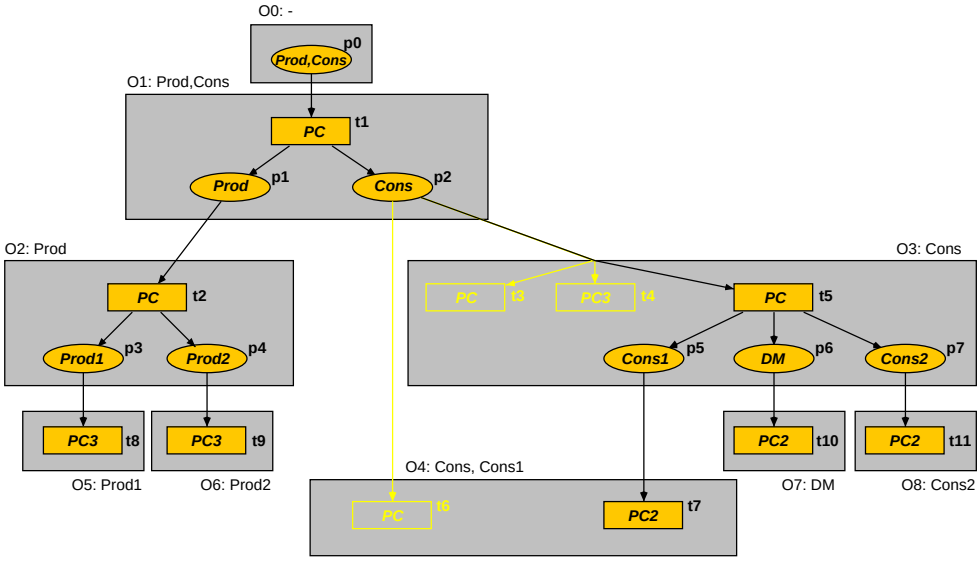


Abbildung 11.12: Prozess eines Organisationsnetzes

Beweis: Die Abbildung $(R \circ \phi)$ und $(D \circ \phi)$ sind offensichtlich Rollen- und Dienstzuweisungen. Damit ist $(K, (R \circ \phi), (D \circ \phi))$ ein ein R/D-Netz. Außerdem stellt $\psi \circ \phi_{|E}$ eine Steuerung dar.

Offensichtlich ist K ein Kausalnetz. Es besitzt genau einen Platz als minimalen Knoten besitzt, da der Prozess zu $(N, \{p\})$ generiert wurde. Nach Theorem 10.15 gilt zudem $K^\circ \subseteq E$. Damit ist $(K, (R \circ \phi), (D \circ \phi), (\psi \circ \phi_{|E}))$ ein Teamnetz. q.e.d.

Die lokale Steuerung $\psi_K = (\psi \circ \phi_{|E})$ erweitert sich nach Definition 10.18 zu der globalen Steuerung $\hat{\psi}$.

Das folgende Theorem zeigt, dass die an eine koordinierende Organisation gestellte Bedingung $\forall t \in T : Proc(D(t), \psi(t)) \neq \emptyset$ konstruktiv entscheidbar ist.

Theorem 11.9 *Sei Org eine wohlgeformte Organisation, dann ist die Menge aller Prozesse*

$$\mathcal{K}^{pg}(Org) := \bigcup_{p \in P} \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$$

eine endliche, konstruktive Menge.

Beweis: Dies folgt aus der Tatsache, dass jedes Prozessnetz (K, ϕ), die folgende Eigenschaft besitzt:

$$(\phi(b_1) = \phi(b_2)) \Longrightarrow (b_1 = b_2)$$

Denn wenn $\phi(b_1) = \phi(b_2)$ für zwei Stellen b_1 und b_2 wäre, dann wäre $R(\phi(b_1)) = R(\phi(b_2))$ in dem Teamnetz $G_{Org}(K, \phi)$ und nach Theorem 10.12 folgt dann $b_1 = b_2$.

Im jedem Prozess besitzt jede Stelle somit höchstens ein Urbild. Die Menge aller Prozesse, mit dieser Eigenschaft ist offensichtlich endlich und auch konstruktiv. q.e.d.

Jede Organisation ist somit ein Erzeuger einer Menge von Teamnetzen:

$$\mathcal{G}(Org) := \{G_{Org}(K,\phi) \mid (K,\phi) \in \mathcal{K}^{pg}(Org)\} \tag{11.8}$$

Damit können wir ein Multiagentensystem als organisiert definieren, wenn die Menge seiner Teamnetze $\mathcal{G}$ durch eine wohlgeformte Organisation *Org* erzeugt wird: $\mathcal{G} = \mathcal{G}(Org)$ und alle Teamnetze im Sinne von Definition 10.25 vom Multiagentensystem akzeptiert werden: $\mathcal{G} = \mathcal{G}_{akz}(\mathcal{A}_\mu, \mu)$.

Definition 11.10 *Das zur Teammenge $\mathcal{G}$ gebildete Multiagentensystem $(\mathcal{A}_\mu, \mu)$ heißt* organisiert*, wenn es eine wohlgeformte Organisation Org gibt, so dass gilt:*

$$\mathcal{G} = \mathcal{G}_{akz}(\mathcal{A}_\mu, \mu) = \mathcal{G}(Org)$$

11.2.1 Koordinierung: Realisierbarkeit der Steuerung

Ein Organisationsprozess (K,ϕ) kann die Steuerung *realisieren*, wenn es für jedes Ereignis e möglich ist, einen Prozess π des Dienstes $D(e)$ zu finden, der die globale Steuerung $\hat{\psi}_K(e)$ erfüllt:

$$(K,\phi) \models \hat{\psi}_K :\Longleftrightarrow \forall e \in E_K : \exists \pi \in Proc(D(e)[R(b(e))]) : \pi \models \hat{\psi}_K(e) \tag{11.9}$$

Für die Wohlgeformtheit einer koordinierender Organisation fordern wir, dass jeder Organisationsprozess die globale Steuerung realisieren kann.

Die Dienstnetze $D(t)$ und Rollenprofile $R(p)$ müssen zur Struktur des Organisationsnetzes passen, d.h wohlgeformt sein. Hier lässt sich die Begriffsbildung aus dem Bereich der Teams verwenden nach Definition 10.10 und 10.18.

Definition 11.11 *Eine Steuerung ψ heißt* wohlgeformt*, wenn für alle Organisationsprozesse mindestens ein Dienstprozess existiert, der die globale Steuerung $\hat{\psi}$ erfüllt:*

$$\forall R \in \mathcal{R} : \forall p \in Start_{Org}(R) : \forall (K,\phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N,\{p\}) : (K,\phi) \models \hat{\psi}_K$$

Eine koordinierende Organisation (Org, ψ) heißt wohlgeformt*, wenn Org und ψ wohlgeformt sind.*

Wohlgeformte Organisationen erzeugen nur wohlgeformte Teams.

Theorem 11.12 *Ist die Organisation $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ wohlgeformt, so ist für alle Prozesse $(K,\phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N,m)$ auch $G_{Org}(K,\phi)$ ein wohlgeformtes R/D-Netz.*

Ist die koordinierende Organisation (Org, ψ) wohlgeformt, dann ist für alle Prozesse $(K,\phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N,m)$ auch $G_{(Org,\psi)}(K,\phi)$ ein wohlgeformtes koordinierendes Team.

Beweis: Da *Org* wohlgeformt ist und Wohlgeformtheit eine Eigenschaft ist, die sich nur auf die Lokalität bezieht, gilt sie auch in den Entfaltungen von N, d.h. für alle Prozesse $(K,\phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N,m)$.

Da (Org, ψ) wohlgeformt ist, gilt $(K, \phi) \models \hat{\psi}_K(e)$ für alle $R \in \mathcal{R}$, $p \in Start_{Org}(R)$ und $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$.

Dabei gilt $(K, \phi) \models \hat{\psi}_K(e)$ nach (11.9) genau dann, wenn für alle $e \in E_K$ ein Prozess π mit $\pi \models \hat{\psi}_K(e)$ existiert, d.h. das erzeugte Team $G_{(Org,\psi)}(K, \phi) = (K, (R \circ \phi), (D \circ \phi), (\psi \circ \phi_{|E}))$ ist wohlgeformt. q.e.d.

Betrachten wir zunächst eine hinreichende Charakterisierung der Wohlgeformtheit. Die maximal strenge Steuerung der Organisation (Org, ψ) ist definiert als

$$\xi^{\max}_{Org} := \bigwedge_{t \in T_N} \hat{\psi}(t) \tag{11.10}$$

Offensichtlich gilt für die maximal strenge Steuerung:

$$\forall t \in T_N : \xi^{\max}_{Org} \Longrightarrow \hat{\psi}(t) \Longrightarrow \psi(t)$$

Ein besonderer Fall liegt vor, wenn für alle Dienstnetze $D(t)$ ein Dienstprozess π existiert, der $\xi^{\max}_{Org}$ erfüllt. In diesem Fall realisieren alle Organisationsprozesse die Steuerung, woraus folgt, dass die Organisation wohlkoordiniert ist.

Theorem 11.13 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ eine wohlgeformte, koordinierende Organisation. Existiert zu jedem $t \in T_N$ ein $\pi \in Proc(D(t), \xi^{\max}_{Org})$, dann ist (Org, ψ) wohlgeformt.*

Beweis: Zu jedem $t \in T_N$ existiert nach Vorraussetzung mindestens ein Dienstprozess π_t mit $\pi \models \xi^{\max}_{Org}$, was $\pi \models \hat{\psi}(t)$ impliziert, da $\xi^{\max}_{Org} \Longrightarrow \hat{\psi}(t)$ gilt.

Wir zeigen, dass dieser Dienstprozess π_t die Wohlgeformtheitsbedingung erfüllt: Sei $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ ein Prozess zu beliebigen $R \in \mathcal{R}$ und $p \in Start_{Org}(R)$, dann gilt für alle $e \in E_K$:

$$\begin{array}{rclcrcl} \hat{\psi}_K(e) & = & \bigwedge_{(e',e) \in F^*_K} \psi_K(e') & = & \bigwedge_{(e',e) \in F^*_K} (\psi \circ \phi_{|E})(e') & & \\ & = & \bigwedge_{(e',e) \in F^*_K} \psi(\phi_{|E}(e')) & = & \bigwedge_{(e',e) \in F^*_K, \phi(e') = t'} \psi(t') & = & \bigwedge_{t' \in T_e} \psi(t') \end{array}$$

Hierbei definieren wir $T_e := \phi^{-1}(_F^*_K e) = \{t \in T \mid \exists e' \in E_K : (e', e) \in F^*_K, \phi(e') = t\}$. Aus $T_e \subseteq T$ folgt:

$$\xi^{\max}_{Org} = \bigwedge_{t \in T_N} \psi(t) \Longrightarrow \bigwedge_{t \in T_e} \psi(t) = \hat{\psi}_K(e)$$

Also gilt auch $\pi_{\phi(e)} \models \hat{\psi}_K(e)$ für alle Ereignisse $e \in E_K$ aller Prozesse (K, ϕ), d.h. die Wohlgeformtheitsbedingung ist erfüllt. q.e.d.

Sei Org eine wohlgeformte Organisation mit dem Organisationsnetz N. Zu jeder Transition t gibt es verschiedene Markierungen und Prozesse, in denen t vorkommt. Die Menge aller globalen Steuerungen ist dann:

$$\Xi_{Org}(t) := \{\hat{\psi}_K(e) \mid p \in P, (K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\}), e \in E_K, \phi(e) = t\}$$

Damit ist Wohlgeformtheit konstruktiv entscheidbar, denn es gilt folgende Aussage.

Theorem 11.14 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ eine wohlgeformte, koordinierende Organisation.*

1. *Genau dann wenn zu jedem $t \in T_N$ und zu jedem $\xi \in \Xi_{Org}(t)$ ein Prozess $\pi \in Proc(D(t), \xi)$ existiert, dann ist Org wohlgeformt.*

2. *Für alle $t \in T$ eines Organisationsnetzes ist $\Xi_{Org}(t)$ ist eine endliche, konstruktive Menge.*

Beweis: Die erste Eigenschaft folgt direkt aus Definition 11.11. Dass $\Xi_{Org}(t)$ eine endliche Menge ist, folgt aus der Tatsache, dass $\mathcal{K}^{pg}(Org)$ dies ist. q.e.d.

Kann nicht sichgestellt werden, dass jeder Prozess korrekt ist, so sind entweder einige – oder alle – Regeln $\psi(t)$ zu verschärfen oder es muss verhindert werden, dass dieses Team gewählt werden kann (siehe auch den Abschnitt 12.2 zu Transformation von Organisationen). Eine koordinierende Organisation darf nur korrekte Prozesse zulassen. Natürlich kann man Wohlgeformtheit leicht erreichen, wenn man bereits alle proaktiven Transitionen auf korrekte Prozesse einschränkt. Dabei wird jedoch im allgemeinen das mögliche Verhalten der nachfolgenden Positionen sehr stark eingeschränkt, was deren Flexibilität einschränkt. Hier ist also ein Ausgleich zwischen Wohlgeformtheit und Flexibilität zu erzielen.

11.2.2 Stabilität der Koordinierung

In der Definition der Wohlgeformtheit (Definition 10.26) wird für ein Multiagentensystem gefordert, dass zu jede Gruppe G einen gemeinsamen Teamplan π_G des Teamnetzes $D(G)$ auswählt und dass dieser Teamplan die Steuerbedingung $\hat{\psi}(G)$ des Teams erfüllt. Dieser Teamplan π_G muss zudem noch einen korrekt terminierten Ablauf des Dienstes beschreiben. Letzteres ist dann besonders einfach zu sicherzustellen, wenn das durch $\hat{\psi}(G)$ gesteuerte Teamnetzes $D(G)$ schwach korrekt ist (vgl. Definition 9.46).

Wir sind nun daran interessiert, ob die Organisation nur korrekte gesteuerte Gruppen generiert. Dabei müssen wir berücksichtigen, dass jedes Team G von einem Prozess (K, ϕ) des Organisationsnetzes abgeleitet wird, d.h. $G = G(K, \phi)$ für einen Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ mit $p \in Start_{Org}(R)$ und $R \in \mathcal{R}$. Organisationen mit dieser Eigenschaft nennen wir *koordinationsstabil*.

Theorem 11.15 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ eine koordinierende Organisation. Es ist entscheidbar, ob Org koordinationsstabil ist, d.h. ob für alle $R \in \mathcal{R}$, $p \in Start_{Org}(R)$ und $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ gilt, dass $D(G(K, \phi)) \times \hat{\psi}(G(K, \phi))$ ein schwach korrektes Dienstnetz ist.*

Beweis: Da die Menge aller Delegationsprozesse $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ einer wohlgeformten Organisation endlich sind, kann die Eigenschaft der Koordinationsstabilität überprüft werden. q.e.d.

11.3 Organisationspositionen als Agenten

Im folgenden entwicklen wir ein dualistisches Agentenmodell, indem wir auch die Positionen durch Agenten realisieren. Diese Agenten integrieren Handlungsablauf- und Organisationsstrukturbeschreibungen. Wir schließen damit an die Ergebnisse aus Kapitel 8 an, in dem wir gezeigt haben, dass Makro- und Mikroperspektive in einem dualistischen Verhältnis zueinander stehen und nur zwei Seiten der selben Medaille sind. Auch aus dieser Betrachtungsweise ist folgerichtig, dass die strukturellen Elemente, wie die Positionen, und die interaktiven Elemente, wie die Akteure, durch das gleiche Konstrukt beschrieben werden.

Organisationale Koordination- und individuelle Handlungspläne stehen in wechselseitiger Beziehung, in dem die organisationalen Koordinierungspläne die Handlungspläne der Organisationsmitglieder rahmen und umgekehrt die Handlungen der Mitglieder die Organisationsabläufe mit Leben erfüllen.[4]

Wir betrachten nun Positionen als Agenten, indem wir uns auf die lokale Perspektive, die eine Position O bezüglich der Organisation besitzt, beschränken. In dieser Perspektive sind nur die Position sichtbar, zu denen O eine Verbindung besitzt. Außerdem blenden wir, wie in Abbildung 11.13 gezeigt, den internen Aufbau der umgebenden Positionen aus, da dieser für O nicht sichtbar ist.

Mit jeder Position ist eine Menge von Rollen verbunden. Als Rollenprofil einer Position $O \in \mathcal{O}$ bezeichnen wir die Menge der Rollen, die die Position anderen gegenüber bereitstellt:

$$R(O) := R({}^{\bullet}(O \cap T) \setminus O) \tag{11.11}$$

Der Organisationseinheit $O \in \mathcal{O}$ wird ein Agent $Ag(O)$ zugewiesen. Diese Agenten nennen wir *Positionsagenten*. Der der Position O zugeordnete Positionsagent ist ein Agent, der das Rollenprofil $R(O)$ einnimmt.[5] Wie wir in Kapitel 9 bereits festgestellt haben, spezifizieren Rollenkomponenten von Dienstnetzen die Rechte und Pflichten einer Rolle. Ebenso definieren Positionen ebenfalls

[4] An dieser Stelle erneut eine Bemerkung zur ontologischen Stellung von Organisationen: Die Aktvität der Organisation ergibt sich stets im konkreten Zusammenspiel von Formalstruktur und Mitgliedern. Und obwohl eine Organisation ohne Mitglieder keine Handlungen hervorbringen kann, wäre es demnach falsch, ihr den Akteursstatus abzusprechen. Dafür lassen sich zwei Argumente ins Feld führen. Das erste Argument behandelt den Kommunikationsaspekt: Andere Akteure können sich in ihrem Handeln auf die Organisation beziehen, ohne dazu Mitglied sein zu müssen. Die Möglichkeit einer Kommunikationsbeziehung zeigt hier die soziale Existenz. In diesem Fall zeigt sich der Akteursstatus durch die Mitgliedschaft in den durch den Beobachter rekonstruierten Kommunikationsprozessen. Das zweite Argument besagt, dass Organisationen Akteure sind, weil ihre Verfahrensregelungen eine eigene Dynamik besitzen. Auch wenn diese Dynamik von den Mitgliedern erzeugt wird, ist sie nicht den Mitgliedern zuzurechnen, sondern der Entität Organisation, da diese der primärer Ursprung der Handlungslogik ist. Auch hier zeigt sich die Organisation dem Beobachter als eigenständiger Akteur, mit dem die Organisationsmitglieder interagieren.

[5] Von $R(O)$ ist die Menge $R(O \cap P) = \{R(p) \mid p \in (O \cap P)\}$ zu unterscheiden, d.h. die Menge der Rollen, die eine Position zur Ausführung der mit seinem Profil verbundenen Dienste nutzt.

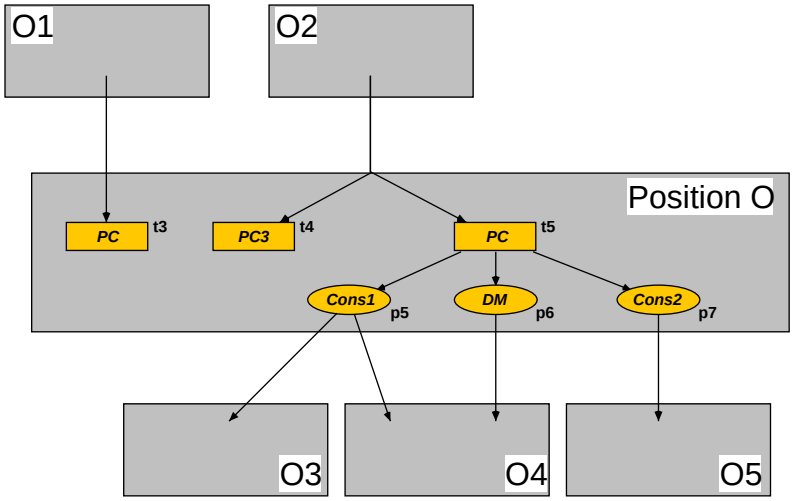


Abbildung 11.13: Lokale Perspektive einer Position

Rechte und Pflichten. Die Rechte einer Position definieren sich über die Delegationsmöglichkeiten, Pflichten sind über die Rollen $R(O)$ definiert.

Jede Position muss mit einem Agenten besetzt werden, der das Rollenprofil wahrnehmen kann. Um das Rollenprofil wahrnehmen zu können, stehen der Position die ihr zugewiesenen Dienste zur Vefügung:

$$D(O \cap T) = \{D(t) \mid t \in (O \cap T)\}$$

Man beachte, dass der Dienst, der bei der Auswahl der Tätigkeit t ausführt wird, nur in der Einschränkung $D(t)[R(^\bullet t)]$ genutzt wird, d.h. nur der Anteil der Interaktion, die die genutzten Rollenprofile betrifft.

Beispiel Betrachten wir die Organisation aus der Abbildung 11.1. Das Rollenprofil $R(O)$ ist in der Abbildung an den Positionen annotiert. Die Positionen definieren folgende Rollenprofile: $R(O_1) = \{Prod, Cons\}$, $R(O_2) = \{Prod\}$, $R(O_3) = \{Cons\}$ und $R(O_4) = \{Cons, Cons_1\}$.

Sie implementieren folgende Dienste: $D(O_1) = \{PC\}$, $D(O_2) = \{PC_2\}$ $R(O_3) = \{PC, PC_3\}$ und $R(O_4) = \{PC, PC_2\}$. ◇

Die Art und Weise, wie Positionen agieren, entspricht denen der SONAR-Agenten (vgl. dazu Abbildung 11.14). Die organisationalen Routinen, die den Teamformationsprozess steuern, sind durch das Organisationsnetz festgelegt. Jedes Teamnetz G koordiniert die Teamplanung, welche das organisationale Pendant zur Akteursplanung darstellt. Die Ausführung des gemeinsamen Teamplans π_G als spezifische Form der sozialen Konstellation korrespondiert zur Interaktivität des Akteurs. Wir erkennen also in Abbildung 11.14 die in Abbildung 8.17 dargestellte selbstähnliche Korrespondenz von Mikro- und Makroprozessen wieder.

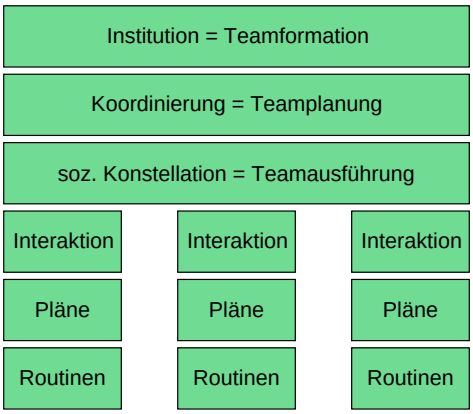


Abbildung 11.14: Positionen als Agenten

11.4 Multiagentensystemorganisationen

Wir betrachten die Ausführungsumgebung, mit deren Hilfe die Agenten und ihre Pläne in organisationale Abläufe und Strukturen eingebettet werden. Betrachten wir eine Organisation $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$. Eine *MAS-Organisation* ist eine Instanz einer formalen Organisation. Jeder Organisationseinheit $O \in \mathcal{O}$ wird dazu der Agentenname A_O und der Positionsagent $Ag(O)$ zugewiesen. Jede MAS-Organisation generiert ein Multiagentensystem, das generierte SONAR-*MAS*, indem man jeder Organisationsposition $O \in \mathcal{O}$ den Agenten A_O zuweist. Abbildung 11.15 zeigt ein Beispiel einer MAS-Organisation.

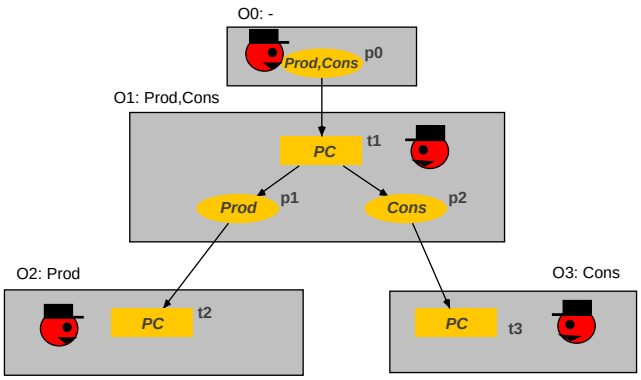


Abbildung 11.15: Eine MAS-Organisation

Für eine gegebene Organisation Org setze die Menge an Agentennamen zu $\mathcal{A} = \{A_O \mid O \in \mathcal{O}\}$, die Dienstklasse $\mathcal{D}$ als die kleinste Dienstklasse, die $\{D(t) \mid t \in T_{Org}\}$ enthält, die Rollenstruktur zu $\mathcal{R} = \{R(D) \mid D \in \mathcal{D}\}$ und die Menge an Gruppennetzen zu $\mathcal{G} = \mathcal{G}(Org)$. Damit ist die Menge der SONAR-Agenten $\mathcal{S}_{(\mathcal{A},\mathcal{R},\mathcal{D},\mathcal{G})}$ festgelegt.

Definition 11.16 *Eine* MAS-Organisation (Org, Ag) *besteht aus*

1. *einer koordinierten Organisation* $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ *und*
2. *einer Injektion* $Ag : \mathcal{O} \to \mathcal{S}_{(\mathcal{A},\mathcal{R},\mathcal{D},\mathcal{G})}$*, die jeder Position einen Positionsagenten zuweist.*

Sei (Org, Ag) *eine MAS-Organisation, dann bezeichnet*

$$\mu(Org, Ag) := (\{A_O \mid O \in \mathcal{O}\}, Ag)$$

die Klasse der von ihr generierten SONAR-MAS.

Für jede Stelle $p \in P$ *des Organisationsnetzes bezeichnet* $\mathcal{O}_{dlg}(p)$ *die Menge aller Positionen und* $\mathcal{A}_{dlg}(p)$ *die Menge aller Agenten, an die die Bearbeitung delegiert werden kann:*

$$\begin{array}{lcll} \mathcal{O}_{dlg}(p) & := & O(p^\bullet) & = & \{O(t) \mid t \in p^\bullet\} \\ \mathcal{A}_{dlg}(p) & := & Ag(\mathcal{O}_{dlg}(p)) & = & \{Ag(O(t)) \mid t \in p^\bullet\} \end{array} \tag{11.12}$$

Für jede Transition $t \in T$ *des Organisationsnetzes bezeichnet* $\mathcal{O}_{gen}(t)$ *die Menge aller Positionen und* $\mathcal{A}_{gen}(t)$ *die Menge aller Agenten, die Aufträge für* t *generieren können:*

$$\begin{array}{lcll} \mathcal{O}_{gen}(t) & := & O({}^\bullet t) & = & \{O(p) \mid p \in {}^\bullet t\} \\ \mathcal{A}_{gen}(t) & := & Ag(\mathcal{O}_{gen}(t)) & = & \{Ag(O(p)) \mid p \in {}^\bullet t\} \end{array} \tag{11.13}$$

Wir weisen darauf hin, dass die Organisationsstruktur sich sehr unterschiedlich auf die Interaktionsprozesse auswirken kann. So ist es möglich, dass zwei Positionsagenten miteinander in Teamplanungsprozessen miteinander interagieren, obwohl sie nach dem Organisationsnetz in keiner Verbindung miteinander stehen. Dies liegt daran, dass ein Organisationsnetz die Positionen bezüglich der Delegationsmöglichkeiten relationiert, nicht aber bezüglich der Interaktivität. Ein Beispiel stellt die Organisationsform des Marktes ist Abbildung 11.3 dar: Nach dem Organisationsnetz stehen Erzeuger und Verbraucher in keiner Delegationsbeziehung. Gleichwohl ist jeweils ein Erzeuger und ein Verbraucher Mitglied in den generierbaren Teams, in denen sie auch miteinander interagieren.

11.4.1 Zugriffsrechte

Den Positionen einer Organisation sind im allgemeinen *Zugriffsrechte* auf Ressourcen zugeordnet. In Agentensystemen stellen insbesondere die Einträge der Wissensbasen solche Ressourcen dar. Wollen wir diese Zugriffsrechte modellieren, so ordnen wir jeder Position $O \in^m athcalO$ durch die Abbildung $DB : \mathcal{O} \to 2^{\mathcal{DB}}$ Zugriffsrechte für eine Menge an Datenbankschlüsseln $DB(O)$ zu. Wir setzen hierbei wie schon in Abschnitt 10.4.2 eine globale Menge $\mathcal{DB}$ an Datenbankschlüsseln voraus. Die Menge $DB(O)$ stellt dann diejenigen Datenbankeinträge dar, auf welche die Position Zugriffsrechte besitzt. In der graphischen Darstellung können die Datenbankschlüsseln $DB(O)$, auf die eine Position O Zugriff hat, als Anschrift an der Position O notiert werden.

Eine Organisation mit Zugriffsrechten ist dann das Tupel $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, DB)$. Eine koordinierende Organisation erweitert sich analog zu $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi, DB)$.

Für die Wohlgeformtheit fordern wir dann zusätzlich, dass jede Position Zugriffsrechte für die Schlüssel besitzt, die von den Diensten $D(t)$ manipuliert werden, also für $DB(D(t))$. Hierbei haben wir nur die „finalen“ Transitionen zu berücksichtigen, die tatsächlich den Teamdienst $D(G)$ ausführen, d.h. nur solche Transitionen t mit $t^\bullet = \emptyset$. Formal muss also gelten:

$$\forall O \in \mathcal{O} : \forall t \in T \cap O : t^\bullet = \emptyset \Longrightarrow DB(D(t)) \subseteq DB(O) \tag{11.14}$$

Der Positionsagent $A = Ag(O)$, der einer Position O zugeordnet ist, muss dann in seiner Datenbank Einträge zu den Schlüsseln vorhalten, auf die die Position Zugriffsrechte besitzt:

$$\forall O \in \mathcal{O} : DB(O) \subseteq DB_{Ag(O)} \tag{11.15}$$

11.4.2 Organisationsteams

Ist eine MAS-Organisation (Org, Ag) gegeben, so kann anhand eines gegebenen Prozesses (K, ϕ) ein Gruppennetz nach Definition 10.21 konstruiert werden. Dazu ist die Agentenabbildung A_G angeben. Jede Aktivität e im Prozess wird auf die Tätigkeit $\phi(e)$ abgebildet, die sich in der Position $O(\phi(e))$ befindet, die vom Positionsagenten $Ag(O(\phi(e)))$ implementiert wird. Dies ist der Agent $A_G(e)$, der e zuzuweisen ist.

Theorem 11.17 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ eine koordinierende Organisation und $R \in \mathcal{R}$ eine Rolle. Dann generiert jeder Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ zu einem $p \in Start_{Org}(R)$ die Gruppe:*

$$G(K, \phi) := (K, (R \circ \phi), (D \circ \phi), \psi \circ \phi_{|E}, (Ag \circ O \circ \phi))$$

Beweis: Wir wissen bereits aus Theorem 11.8, dass $(K, (R \circ \phi), (D \circ \phi), (\psi \circ \phi_{|E}))$ ein Teamnetz ist.

Nach Definition 10.21 muss für die Besetzung A eines Gruppennetzes $A(p) = A(t)$ für alle $p \in t^\bullet$ gelten. Wie bereits dargelegt ist zudem durch $A = (Ag \circ O \circ \phi)$ eine Besetzung definiert, die zur Organisationsstruktur passt, denn in einer Position O gilt nach Definition $t \in O \Longrightarrow t^\bullet \subseteq O$ (vgl. Def. 11.1). q.e.d.

11.4.3 Holonische MAS-Organisationen

In der folgenden formalen Darstellung werden wir uns bei der Erzeugung einer MAS-Organisation auf die elementaren Positionen einschränken, wir betrachten also keine holonischen Positionen. Wir wollen aber kurz skizzieren, wie diese abgebildet würden. Besitzt das Organisationsmodell eine holonische Verfeinerungsstruktur ν, so ergibt sich eine MAS-Organisation, die neben den Positionsagenten A_O noch holonische Verwaltungsagenten enthalten, also den *head* und den *proxy*. Wir betrachten also die Menge der Organisation $ORGS(Org, \nu)$ nach (11.7). Ein Beispiel für eine holonische MAS-Organisation ist in Abbildung 11.16 dargestellt. Diese MAS-Organisation ist von der Organisation in Abbildung 11.11 abgeleitet. Der Verwaltungsagent des vergröberten Systems ist

der *Holon-Proxy* $O_{proxy}(\mathcal{Q})$ für $\mathcal{Q} = \{O_3, O_4, O_5, O_6\}$. Er ergibt sich aus der Tatsache, dass die bezüglich der Positionsteilmenge $\mathcal{Q}$ generierte Suborganisation nicht komplett gelöscht wird, sondern durch eine frische Position $O_{\mathcal{Q}}$ ersetzt wird, die aus der Transition $t_{\mathcal{Q}}$ besteht (vgl. Def. 11.5). Der Verwaltungsagent des Subsystems ist der *Holon-Kopf* $O_{head}(\mathcal{Q})$. Er ergibt sich aus der Tatsache, dass die bezüglich der Positionsteilmenge $\mathcal{Q}$ generierte Suborganisation nicht nur alle Stellen und Transitionen aus $\mathcal{Q}$ besitzt, sondern auch noch diejenigen Stellen und deren Positionen, die im Vorbereich von $\mathcal{Q}$ liegen.

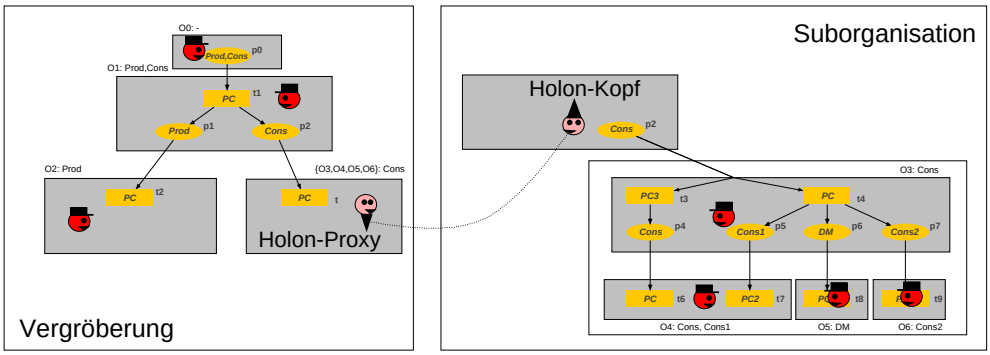


Abbildung 11.16: Die holonische MAS-Organisation zu Abbildung 11.11

Ein Multiagentensystem, das wir erhalten, wenn wir alle Organisationsmodelle in $ORGS(Org, \nu)$ betrachten und diese mittels der ebenfalls erzeugten Holon-Agenten verbinden, bezeichnen wir dann als SONAR^2-MAS. Die Abkürzung SONAR^2-MAS steht für die holonische Struktur. Wir betrachten SONAR-MAS, die sich rekursiv wiederum aus SONAR-MAS zusammensetzen. In symbolischer Notation: SONAR^2-MAS = SONAR-MAS $\circ$ SONAR-MAS = SONAR-MAS(SONAR-MAS)

Die SONAR-Agenten, welche holonische Positonen beschreiben – also der *Holon-Proxy* und der *Holon-Kopf*, haben dann im wesentlichen Verwaltungsaufgaben, die darin bestehen, die Suborganisation nach außen hin als eine Einheit zu repräsentieren. Der Holon-Proxy $O_{proxy}(\mathcal{Q})$ kommuniziert nur mit seinem Holon-Kopf $O_{head}(\mathcal{Q})$. Beide bilden ein untrennbares Paar, das wir als *Holon* bezeichnen. Jedes Holon ist ein Zwitterwesen aus Plattform und Agent: Von außen betrachten ist ein Holon eine Einheit. Die sich außerhalb befindenden Positionsagenten kommunizieren nur mit ihm und nicht mit den enthaltenen Agenten. Empfängt ein Holon eine Nachricht für einen eingebetteten Agenten, so sendet er die Nachricht weiter, nachdem er sich selbst als Absender eingetragen hat. Für den eingebetteten Agenten stammt die Nachricht also vom Holon. Umgekehrt kommunzieren die aggegierten Agenten eines Holons nur indirekt mit der Außenwelt, indem sie die Nachrichten zunächst an den Holon schicken. Der Holon sendet die Nachricht weiter, nachdem er sich selbst als Absender eingetragen hat. Damit auf Nachrichten auch geantwortet werden kann, verwaltet der Holon eine Tabelle, in der festgehalten wird, woher die Nachrichten ursprünglich stammten. Technisch gesehen ist ein Holon somit eine Mischung

aus Plattform (inklusive der Verwaltung eingebetteter Agenten und der Nachrichtenweiterleitung) und Agent (zuständig für das Teamwork an sich).

11.5 Konstruktion wohlorganisierter Multiagentensysteme

Im folgenden zeigen wir, dass eine Organisation genug Struktur enthält, um ein Multiagentensystem generativ zu definieren, das genau der formalen Organisation entspricht. Wir betrachten konkret, wie man anhand einer gegebenen Organisation ein wohlgeformtes, wohlkoordinierendes SONAR-MAS konstruieren kann.

Zwischen der Organisation und den Positionsagenten müssen Konsistenzbeziehungen erhalten sein. Dies umfasst somit die Tätigkeiten, die Profile, die Rollen und das Organisationsnetzwerk. Die Rollenfähigkeiten ρ_A und die Handlungsmöglichkeiten sind durch die Organisation implizit festgelegt. Jeder Dienst D kann vom Agenten A durch solche Tätigkeiten geleistet werden, die erstens dem Agenten A zugeordnet sind (d.h. $t \in Ag^{-1}(A) \cap T$ muss gelten) und die zweitens in der Organisation D zugeordnet sind (d.h. $D(t) = D$ muss gelten). Für jede solche Tätigkeiten t muss A dann mindestens die Rollen der Positionen im Nachbereich $t^\bullet$ realisieren.

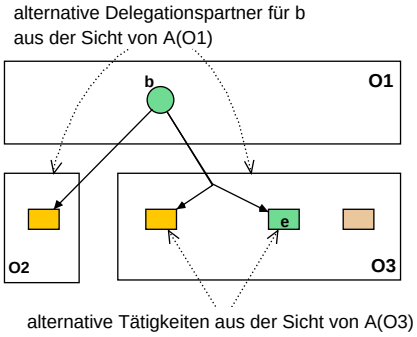


Abbildung 11.17: Auswahlpunkte

Jeder Agenten kodiert in $\Delta_A(G)(b)$ Handlungsmöglichkeiten, um auf die Rolle zu reagieren. Ist das Team G ein Prozess von N, so ist b die Stelle $p = \phi(b)$ zugewiesen. Als Tätigkeiten kommen in der Organisation jetzt solche in Frage, die erstens dem Agenten A zugeordnet sind (d.h. $t \in Ag^{-1}(A) \cap T$ muss gelten) und die zweitens im Nachbereich von $p = \phi(b)$ liegen (d.h. $t \in \phi(b)^\bullet$ muss gelten). Dies ist in Abbildung 11.17 illustriert. Mit der Wahl einer Tätigkeit t sind durch den Nachbereich bereits die Rollen der Partner festgelegt: Für jedes Rollenprofil $p \in t^\bullet$ ist die Rolle $R(p)$ zu besetzen. Wer diese Rolle implementiert, ist durch die Organisation ebenfalls eingeschränkt, denn es kommen Agenten in Frage, für die eine Tätigkeit $t \in p^\bullet$ existiert und die in der Organisation vom Agenten $Ag(O(t))$ ausgeführt werden, d.h. Agenten aus der Menge $\mathcal{A}_{dlg}(p)$.

Diese zuvor formulierten Bedingungen integrieren wir nun im folgenden in das formale Modell.

11.5.1 Prozessentfaltung

Teamplanung stellt eine Prozessentfaltung des Organisationsnetzes dar. Die Prozesse eines Netzes $N = (P, T, F, m_0)$ lassen sich induktiv charakterisieren:

1. Sei C eine Menge mit $\phi(C) = M_0$, dann ist $((C, \emptyset, \emptyset), \phi)$ ein Prozess von N.

2. Sei $(K, \phi) = ((B, E, F), \phi)$ ein Prozess, der für ein $t \in T$ eine Menge $B_t \subseteq K^\circ$ enthält, die auf die Eingangsstelle ${}^\bullet t$ abgebildet wird, d.h. es gilt $\phi(B_t) = {}^\bullet t$.

   Dann bilden wir die Prozessverlängerung $((B', E', F'), \phi')$ indem wir ein frisches Ereignis e mit $\phi(e) = t$ an alle Stellen in B_t anhängen und eine frische Menge von Bedingungen $B'_t = \{b_p \mid p \in t^\bullet\}$ mit $\phi(b_p) = p$ an das Ereignis e anhängen.

Für Prozesse unter der Fortschrittseigenschaft wird dieses Verfahren solange angewendet, bis es keine Menge $B_t \subseteq K^\circ$ mehr gibt, die auf die Eingangsstelle ${}^\bullet t$ abgebildet wird. Abbildung 11.18 zeigt den Algorithmus zur Konstruktion aller endlichen Prozesse unter der Fortschrittseigenschaft. Der Algorithmus ist nichtdeterministisch in der Auswahl der Transition t und der Menge B_t. Das Verfahren terminiert, wenn der Prozess nicht weiter verlängerbar ist.

---

function $K(N, p)$ is
  $(K, \phi) := ((\{b_0\}, \emptyset, \emptyset), \{(b_0, p)\})$
  while $\exists t \in T : \exists B_t \subseteq K^\circ : \phi(B_t) = {}^\bullet t$ do
    $(K, \phi) := ((B', E', F'), \phi')$ where
      $B'_t = \{b_p \mid p \in t^\bullet\}$
      $B' = B_K \uplus B'_t$
      $E' = E_K \uplus \{e\}$
      $F' = F_K \cup (B_t \times \{e\}) \cup (\{e\} \times B'_t)$
      $\phi' = \phi \cup \{(e, t)\} \cup \{(b_p, p) \mid p \in t^\bullet\}$
  endwhile
  return (K, ϕ)
end

Abbildung 11.18: Algorithmus zur induktiven Prozesserzeugung unter der Fortschrittseigenschaft

11.5.2 Organisationssicht der Teamformation

Teamplanung ähnelt der induktiven Prozesserzeugung. Sei das Organisationsnetz N mit der Rolle R gegeben. Sei p eine Stelle aus $Start_{Org}(R)$, die das Rollenprofil R besitzt. In der Organisation beginnt der Agent $A_p = Ag(O(p))$ mit der

Bearbeitung. Initial definiert A_p das Anfangsstück K, das nur aus einer Stelle b_0 besteht, für die $R_G(b_0) = R_0$ gilt und die durch ϕ auf eine initiale Stelle des Organisationsnetzes abgebildet wird, d.h. es gilt $A_p = Ag(O(p)) = Ag(O(\phi(b_0)))$. Dies ist der initiale Teampräfix.

Zu einem Anfangsstück eines Teams K wird das Team an den Aufgaben $K^\circ \cap B$ weiter entwickelt. Zu jedem $b \in K^\circ \cap B$ ist ein Agent A^b festzulegen, an den die Aufgabe delegiert wird. Dieser Agent A^b wird vom Agenten $A_b = Ag(O(\phi(b)))$ festgelegt.

Da die Teambildungsprozesse miteinander konsistent sein sollen, betrachten wir nun, wie A^b den Präfix weiter entwickelt, denn die Wahl von $Ag(O(\phi(b)))$ muss hiermit identisch sein.

An die Stelle b wird von A^b ein neues Ereignis e angefügt, wobei – aus Organisationssicht – für das Bild $\phi(e)$ nur Transitionen in Frage kommen, die im Nachbereich von $\phi(b)$ liegen und dem gleichen Agenten A^b zugeordnet sind:

$$\phi(e) \in \left(\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b)\right)$$

An das Ereignis e werden die Bedingungen $B'_t = \{b_p \mid p \in t^\bullet\}$ gehängt und es wird $\phi(b_p) = p$ gesetzt.

---

function $K(N, p)$ is
  $(K, \phi) := ((\{b_0\}, \emptyset, \emptyset), \{(b_0, p)\})$
  while $(K^\circ \cap B) \neq \emptyset$ do
    for each $b \in (K^\circ \cap B)$ do
      $A^b \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))$
      $t \in (\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b))$
      $B'_t = \{b_p \mid p \in t^\bullet\}$
      $(K, \phi) := ((B', E', F'), \phi')$ where
        $B' = B_K \uplus B'_t$
        $E' = E_K \uplus \{e\}$
        $F' = F_K \cup \{(b, e)\} \cup (\{e\} \times B'_t)$
        $\phi' = \phi \cup \{(e, t)\} \cup \{(b_p, p) \mid p \in t^\bullet\}$
  endwhile
  return (K, ϕ)
end

Abbildung 11.19: Nichtdeterministischer Teambildungsalgorithmus

Abbildung 11.19 zeigt den Algorithmus zur Teambildung. Der Algorithmus ist nichtdeterministisch in der Auswahl der Transition t und des Agenten A^b. Das Verfahren terminiert, wenn für jede maximale Stelle eine Transition t mit $t^\bullet = \emptyset$ gewählt wird, da dann $(K^\circ \cap B)$ die leere Menge ist. Der konstruierte Prozess beschreibt einen Tätigkeitspfad (vgl. Theorem 10.15). Als Ergebnis der Teambildung erhalten wir ein Kausalnetz (K, ϕ), das das Team $G(k, \phi)$ repräsentiert.

Theorem 11.18 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ eine wohlgeformte Organisation.*

1. *Ist die Markierung $\{p\}$ in N sicher bearbeitbar, dann hat Algorithmus 11.19 die Option zu terminieren.*

2. *Ist N sicher bearbeitbar, dann hat der Algorithmus 11.19 für alle p die Option zu terminieren.*

3. *Ist die Markierung $\{p\}$ in N sicher bearbeitbar, dann ist $\mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ eine nicht-leere Menge.*

Beweis: Wir beweisen die einzelnen Teile in der angegebenen Reihenfolge.

1. Wenn die Markierung $\{p\}$ in N bearbeitbar ist, dann gilt $\mathbf{0} \in RS(N, m)$ für alle m, die von $\{p\}$ erreichbar sind. Also gibt es für alle m Schaltfolgen, so dass $\{p\} \xrightarrow{w_1} m \xrightarrow{w_2} \mathbf{0}$. Da der Algorithmus 11.19 genau dann terminiert, wenn $\mathbf{0}$ erreicht wird und er für jede erreichbare Markierung m die Möglichkeit besitzt diese zu erreichen, besteht auch stets die Option zu terminieren.

2. Die Aussage folgt aus (1).

3. Nach Proposition 10.6 ist die Markierung $\{p\}$ genau dann bearbeitbar, wenn das Nonterminal A_p der kontextfreien Grammatik $G(N, m)$ produktiv ist und nach Proposition 10.15 ist $\mathcal{K}^{pg}(N, \{p\})$ genau dann eine nicht-leere Menge, wenn A_p produktiv in $G(N, \{p\})$ ist.

q.e.d.

Der Teambildungsalgorithmus 11.19 generiert alle möglichen Prozesse.

Theorem 11.19 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D)$ eine wohlgeformte Organisation.Für alle $R \in \mathcal{R}$ und $p \in Start_{Org}(R)$ gilt, dass jeder Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, p)$ vom Teambildungsalgorithmus in Abbildung 11.19 generiert werden kann.*

Beweis: Jeder Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, p)$ kann auch induktiv vom Algorithmus 11.18 zur induktiven Prozesserzeugung erzeugt werden. Beachtet man, dass für R/D-Netze $|{}^\bullet t| = 1$ und daher auch $|B_t| = 1$ gilt, so stellt man fest, dass sich dieser Algorithmus kaum vom Teambildungsalgorithmus 11.19 unterscheidet.

Der einzige Unterschied besteht darin dass die Transition t nicht aus der Menge $\phi(b)^\bullet$, sondern nur aus $\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b)$ gewählt wird.

Da die Wahl $A^b \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))$ beliebig ist, können wir die Vereinigung über alle möglichen A^b betrachten:

$$\bigcup_{A^b \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))} \left(\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b)\right) = \phi(b)^\bullet \cap \left(\bigcup_{A^b \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))} Ag^{-1}(A^b)\right) = \phi(b)^\bullet$$

Die zweite Umformung gilt, da mit $\mathcal{A}_{dlg}(p) = \{Ag(t) \mid t \in p^\bullet\}$ bereits $\phi(b)^\bullet \subseteq \bigcup_{A^b \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))} Ag^{-1}(A^b)$ gilt.

Also hat der Teambildungsalgorithmus die gleiche Auswahl wie der Algorithmus zur induktiven Prozesserzeugung. Dann stimmen also auch die generierten Prozesse überein. q.e.d.

Wir können den Teambildungsalgorithmus aus Abbildung 11.19 leicht in die Form eines verteilten Algortihmus bringen, indem wir die Auswahl des Agenten A^b, an den delegiert wird, als das Senden einer Nachricht interpretieren (vgl. dazu Abbildung 11.20). In diesem Fall erweist sich Teambildung als eine Variante des Echo-Algorithmus.

---

when A receives (K, ϕ, b) do
  choose $t \in (\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A))$
  $B'_t = \{b_p \mid p \in t^\bullet\}$
  $(K', \phi') := ((B', E', F'), \phi')$ where
    $B' = B_K \uplus B'_t$
    $E' = E_K \uplus \{e\}$
    $F' = F_K \cup \{(b, e)\} \cup (\{e\} \times B'_t)$
    $\phi' = \phi \cup \{(e, t)\} \cup \{(b_p, p) \mid p \in t^\bullet\}$
  for each $b' \in B'_t$ do
    choose $A^{b'} \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b'))$
    send (K', ϕ', b') to $A^{b'}$

---

init
  choose $p \in \mathit{Start}_{Org}(R)$
  $(K_0, \phi_0) := ((\{b_0\}, \emptyset, \emptyset), \{(b_0, p)\})$
  send (K_0, ϕ_0, b_0) to $(Ag \circ O \circ \phi)(b_0)$

Abbildung 11.20: Teambildung als verteilter Algorithmus

Den Nichtdeterminismus in Algorithmus 11.19 können wir eleminieren, indem wir das Abbildungstupel $\tau = (\tau^1, \tau^2, \tau^3)$ definieren, mit deren Hilfe der Agent $A_b = (Ag \circ O \circ \phi)(b)$ die Auswahlen $A^b \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))$ und $t \in \phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b)$ trifft. Da wir die Prozesse eigentlich nicht anhand einer Markierung $m = \{p\}$ generieren, sondern zu einer zu implementierenden Rolle R, treffen wir außerdem noch eine Auswahl $p \in \mathit{Start}_{Org}(R)$:

$$\begin{aligned} A^b &= \tau^1(K, \phi, b) \in \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b)) \\ t &= \tau^2(K, \phi, b) \in (\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b)) \\ p &= \tau^3(R) \in \mathit{Start}_{Org}(R) \end{aligned}$$

Auch wenn die Wahl $\tau(K, \phi, b)$ bei der Bearbeitung von b eigentlich nur vom zuständigen Agenten $A_b = (Ag \circ O \circ \phi)(b)$ getroffen wird, muss die Auswahl in allen beteiligten Agenten identisch sein, damit die Formation der Subteams miteinander konsistent verläuft.

Definition 11.20 *Das Abbildungstupel $\tau = (\tau^1, \tau^2, \tau^3)$ heißt* Teamkonstruktor*, wenn die Formation der Subteams konsistent verläuft:*

$$\forall A \in \mathcal{A}_\mu : \tau_A(K, \phi, b) = \tau_{(Ag \circ O \circ \phi)(b)}(K, \phi, b) \tag{11.16}$$

Bei festgelegten Teamkonstruktor τ ist – im Falle der Termination – der vom Algorithmus 11.21 generierte Prozess eindeutig festgelegt. Diesen Prozess bezeichnen wir als $K_\tau(N,p)$. Ist eine Rolle R vorgegeben, so definieren wir:

$$K_\tau(N,R) := K_\tau(N,\tau^3(R)) \tag{11.17}$$

Für die Eindeutigkeit der Konstruktion ist zentral, dass die Reihenfolge der Auswahl der $b \in (K^\circ \cap B)$ keine Auswirkung auf das Ergebnis hat, da der Prozess für jedes b an disjunkten Stellen weiter entwickelt wird.

---

function $K_\tau(N,p)$ is
  $(K,\phi) := ((\{b_0\},\emptyset,\emptyset),\{(b_0,p)\})$
  while $(K^\circ \cap B) \neq \emptyset$ do
    foreach $b \in (K^\circ \cap B)$ do
      $A_b = (Ag \circ O \circ \phi)(b)$
      $A^b = \tau^1_{A_b}(K,\phi,b)$
      $t = \tau^2_{A^b}(K,\phi,b)$
      $B'_t = \{b_p \mid p \in t^\bullet\}$
      $(K,\phi) := ((B',E',F'),\phi')$ where
        $B' = B_K \uplus B'_t$
        $E' = E_K \uplus \{e\}$
        $F' = F_K \cup \{(b,e)\} \cup (\{e\} \times B'_t)$
        $\phi' = \phi \cup \{(e,t)\} \cup \{(b_p,p) \mid p \in t^\bullet\}$
    end
  endwhile
  return (K,ϕ)
end

Abbildung 11.21: Algorithmus zur Teambildung $K_\tau(N,p)$

Die Aussage von Theorem 11.19 gilt auch für die deterministische Konstruktion mit Hilfe des Konstruktors τ nach Algorithmus 11.21.

Theorem 11.21 *Sei der Teamkonstruktor τ gegeben. Durch Variation von τ können alle Prozesse erzeugt werden:*

$$\bigcup_\tau K_\tau(N,p) = \mathcal{K}^{pg}(N,p)$$

Beweis: Dazu müssen wir nur beachten, dass wir durch Variation von τ alle Auswahlen realisieren können. Wir erhalten somit die folgende Aussagen:

$$\bigcup_\tau \tau^1(K,\phi,b) = \mathcal{A}_{dlg}(\phi(b))$$

und mit $A_b = (Ag \circ O \circ \phi)(b)$ und $A^b = \tau^1_{A_b}(K,\phi,b)$:

$$\bigcup_\tau \tau^2(K,\phi,b) = \phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b)$$

Also können alle Prozesse erzeugt werden. q.e.d.

Die Variation des Teamkonstruktors τ ist bereits als Lernaktivität im SONAR-Modell vorgesehen, nämlich als die Meta-Planung der Inkorporation. Hierbei wird die Teamgenerationsfunktion γ modifiziert. Da γ aber mit Hilfe des Teamkonstruktors τ definiert wird, verändert die Meta-Planung auch den Teamkonstruktor.

11.5.3 Organisationssicht der Teamplanung

Die Spezifikation eines SONAR-Agenten fordert, dass ein Agent A einen Handlungsplan $\pi_A(G)(D)(p)$ wählt, der bereits ein Teamplan ist, also mit den Handlungsplänen aller anderen Agenten des Teams abgestimmt ist und die Steuerbedingung erfüllt. Jeder Agent wählt also aus Menge der Teampläne (10.18) einen geeigneten Prozess aus. Teamplanung bedeutet also die Erfüllung Teamglobaler Anforderungen durch lokale Planung. Dies ist nur durch verteilte Kompromissfindung möglich.

Wir definieren dazu abstrakt zu jedem Netzknoten $n \in (B_{K_G} \cup E_{K_G})$ des Teamnetzes G eine Kompromissmenge $KS(n) \subseteq \mathit{WFProc}(\mathcal{D}, \mathcal{R})$, die mögliche gemeinsame Pläne enthält. Wir nutzen nun die Teamstruktur aus, um rekursiv den Raum der möglichen Teampläne einzuschränken. Die Blätter $e \in {K_G}^\circ$ von G enthalten alle Prozesse, die einen terminierenden Workflow beschrieben, der zudem noch die Steuerungsbedingung $\hat{\psi}(e)$ erfüllt, d.h. $KS(e) := \mathit{WFProc}(D(e)[R({}^\bullet e)], \hat{\psi}(e))$. Alle Bedingungen b erhalten die Kompromissmenge ihrer Transition im Nachbereich zugewiesen, d.h. $KS(b) := KS(b^\bullet)$. Für jeden inneren Knoten $e \in E_{K_G} \setminus {K_G}^\circ$ wählt die Position $O(e)$ durch die Abbildung $\xi_{O(e)}$ aus der Schnittmenge aller Kindsknoten, d.h. aus $\bigcap_{b \in e^\bullet} KS(b)$, eine Teilmenge aus:

$$\xi_{O(e)}\Big(\{KS(b) \mid b \in e^\bullet\}\Big) \subseteq \bigcap_{b \in e^\bullet} KS(b)$$

Die Kompromissfindung greift somit auf die Abbildungsfamilie $(\xi_O)_{O \in \mathcal{O}}$ zurück, um den Kompromissraum sukzessiv zu verkleinern. Formal ergibt sich:

$$\begin{array}{lcl} KS(b) & := & KS(b^\bullet) \\ KS(e) & := & \begin{cases} \mathit{WFProc}(D(e)[R({}^\bullet e)], \hat{\psi}(e)), & \text{falls } e \in {K_G}^\circ \\ \xi_{O(e)}\big(\{KS(b) \mid b \in e^\bullet\}\big) & \text{falls } e \in E_{K_G} \setminus {K_G}^\circ \end{cases} \end{array} \tag{11.18}$$

Die Kompromissmenge $KS(G)$ ergibt sich dann anhand des Wurzelknotens: $KS(G) := KS({}^\circ K_G)$.

Diese Berechnung können wir uns direkt als verteilten Algorithmus vorstellen (siehe Abb. 11.22). Die Berechnungsschritte beginnen also bei den Blättern $e \in {K_G}^\circ$ und werden entlang des Baumes kombiniert. In einem Agentensystem wird jeder Schritt, der $KS(e)$ berechnet, vom Agenten $(Ag \circ O \circ \phi)(e)$ vorgenommen.

Beispiel Wir können die verteilte Kompromissfindung am Beispiel des Teamnetzes aus Abbildung 11.12 betrachten. Die Blätter des Teams sind t_8, t_9, t_7, t_{10} und t_{11}, die folgendermaßen ihren Rollenkomponenten zugewiesen sind:

when agent $A = Ag(O(t))$ receives CS from agent $Ag(O(p)), p \in t^\bullet$ then
$CS_{A,p} := CS$

when agent $Ag(O(t))$ has received CS from all agent $Ag(O(p)), p \in t^\bullet$ then
$$CS_{A,t} := \begin{cases} Proc_{WF}(D(G)), & \text{if } t \in N^\circ \\ \xi_{O(t)}\big(\{CS(p) \mid p \in e^\bullet\}\big) & \text{if } t \in T_N \setminus N^\circ \end{cases}$$
send $CS_{A,t}$ to $Ag(O({}^\bullet t))$

Abbildung 11.22: Teamplanung als verteilter Algorithmus

	t_8	$PC_3[Prod_1]$	t_2	$PC_3[Prod_1, Prod_2]$	t_1	PC_4
	t_9	$PC_3[Prod_2]$				
	t_7	$PC_2[Cons_1]$	t_5	$PC_2[Cons_1, DM, Cons_2]$		
	t_{10}	$PC_2[DM]$				
	t_{11}	$PC_2[Cons_2]$				

Die Komposition all dieser Komponenten ergibt auch gleichzeitig den Teamdienst $D(G) = PC_4$. Die Komposition ist zwar assoziativ, sie besitzt aber die Tiefenstruktur des Teambaumes.

Die Kompromissfindung fasst nun Teilmengen zusammen, die sich im gleichen Teilast des Teambaumes befinden. Der Agent $Ag(O_2)$ integriert nun die Kompromissmengen $KS(t_8)$ und $KS(t_9)$ zu einer Menge $KS(t_2)$, indem er den Mengenschnitt $KS(t_2) \subseteq KS(t_8) \cap KS(t_9)$ berechnet. Damit fasst t_2 genau seine Kindknoten zusammen. Die Menge $KS(t_2)$ enthält dadurch nur Komponentenprozesse des Dienstes

$$PC_3[Prod_1] \| PC_3[Prod_2] = PC_3[Prod_1, Prod_2].$$

Parallel dazu integriert der Agent $Ag(O_3)$ die Kompromissmengen $KS(t_7)$, $KS(t_{10})$ und $KS(t_{11})$ zu einer Menge $KS(t_5)$. Diese Menge enthält nur Komponentenprozesse des Dienstes

$$PC_2[Cons_1] \| PC_2[DM] \| PC_2[Cons_2] = PC_2[Cons_1, DM, Cons_2].$$

Beide Mengen werden durch $Ag(O_1)$ in $KS(t_1) \subseteq KS(t_2) \cap KS(t_5)$ zusammengefasst. Es handelt sich jetzt um Prozesse von $D(G)$. Diese Menge wird schließlich an die initiale Stelle p_0 weitergeleitet, so dass wir $KS(G) = KS(p_0)$ erhalten. $\diamond$

Um eine detailiertere Kompromissfindung zu ermöglichen, müssen wir die einzelnen Pläne bewerten. Wir nehmen an, dass es k verschiedene Bewertungskriterien gibt. Jeder Transition t eines Dienstnetzes weisen wir durch die Abbildung

$$eval : T \to \mathbb{Z}^k$$

einen Vektor zu. Interpretieren wir die Bewertungskriterien als abstrakte Tauschgüter (Zeit, Geld, Ressourcen usw.), so bedeutet ein positiver Wert im Vektor $eval(t)$, dass die Ausführung einen Gewinn dieses Gutes bewirkt, ein negativer entsprechend eine Investition.

Diese Abbildung *eval* lässt sich auch auf Prozesse (K, ϕ) eines Dienstnetzes D erweitern. Dazu betrachten wir die Multimenge $\phi^\sharp(E_K)$ aller Transitionen im Dienstnetz, deren Vorkommen der Prozess beschreibt. Wenden wir die Multimengenerweiterung der Bewertung $eval^\sharp$ auf diese Multimenge an, so erhalten wir die Bewertung des Prozesses in Form seiner Tauschgüterbilanz:

$$eval(K, \phi) := eval^\sharp(\phi^\sharp(E_K)) \tag{11.19}$$

Wir nutzen nun die Teamstruktur aus, um rekursiv den Raum der möglichen Teampläne einzuschränken. Wir definieren dazu für jedes $i \in \mathbb{N}$ die Abbildung

$$KS^i_\xi : (B_{K_G} \cup E_{K_G}) \to 2^{WFProc(\mathcal{D},\mathcal{R})},$$

die zu jedem Knoten im Teamnetz G eine Kompromissmenge, d.h. mögliche gemeinsame Pläne, aushandelt. Der Parameter i gibt dabei Abweichung der Güte des Kompromisses vom Optimum an: $i = 0$ bedeutet optimal. Die Abbildung weist dazu zunächst jedem Blatt $e \in {K_G}^\circ$ die Menge aller lokal möglichen Pläne zu:

$$KS^i_\xi(e) := WFProc(D(e)[R({}^\bullet e)], \hat{\psi}(e))$$

Jede Stelle $b \in B_{K_G}$ wird die Kompromissmenge ihrer Transition e mit $b^\bullet = \{e\}$ im Nachbereich zugewiesen:

$$KS^i_\xi(b) := KS^i_\xi(b^\bullet)$$

Der Agent $A_e = Ag(O_e), O_e = O(\phi(e))$, der einer inneren Transition $e \in (E_{K_G} \setminus {K_G}^\circ)$ zugeordnet ist, benutzt die Mengen $KS^i_\xi(b)$ aller Stellen $b \in e^\bullet$ im Nachbreich von e, d.h. die Werte, der im Team untergeordneten Agenten $A^b = Ag(O^b), O^b = O(\phi(b^\bullet))$. Jeder Plan π, der sich in allen Mengen $KS^i_\xi(b)$ befindet, wird durch die Abbildung $eval_{O^b}$ von den untergeordneten Agenten bezüglich der k Tauschgüter bewertet. Die Einzelbewertungen $eval_{A^b}(\pi)$ werden nun vom Agenten A_e mit Hilfe der Funktion

$$\xi_{O_e} : 2^{\mathbb{Z}^k} \to \mathbb{N}$$

zu einer integrierten Bewertung zusammengefasst. Durch die Funktionsfamilie $\xi_O, O \in \mathcal{O}$ kann beispielsweise der Gesamtnutzen herangezogen werden. Die Integrationsfunktion sind dabei für jeden Agenten im allgemeinen unterschiedlich. Dann filtert der Agent A_e dann die Pläne heraus, die die beste Bewertung bekommen haben, und gibt sie an den ihn übergeordneten Agenten weiter. Formal ergibt sich die folgende Rekursionsformel:

$$\begin{aligned} KS^i_\xi(b) &:= KS^i_\xi(b^\bullet) \\ KS^i_\xi(e) &:= \begin{cases} WFProc(D(e)[R({}^\bullet e)], \hat{\psi}(e)), & \text{falls } e \in {K_G}^\circ \\ \bigcup_{j=0}^{i} KS^i_\xi(e, m^i_\xi(e) - j), & \text{falls } e \in E_{K_G} \setminus {K_G}^\circ \end{cases} \end{aligned} \tag{11.20}$$

mit

$$\begin{aligned} KS^i_\xi(e, x) &:= \{\pi \in Y^i_\xi(e) \mid g_\xi(\pi, e) = x\} \\ m^i_\xi(e) &:= \max\{g_\xi(\pi, e) \mid \pi \in Y^i_\xi(e)\} \\ g_\xi(\pi, e) &:= \xi_{O(\phi(e))}\big(\{eval_{O(\phi(b^\bullet))}(\pi) \mid b \in e^\bullet\}\big) \\ Y^i_\xi(e) &:= \textstyle\bigcap_{b \in e^\bullet} KS^i_\xi(b) \end{aligned}$$

Hierbei gibt $g_\xi(\pi, e)$ die von A_e vorgenommene integrierte Gesamtbewertung des Planes π an. Der Wert $m^i_\xi(e)$ ist das Maximum der integrierten Bewertungen aller Pläne, die in den Kompromissmengen der untergeordneten Agenten A^b vorkommen. Die Menge $KS^i_\xi(e, x)$ enthält all jene Pläne, die in der Gesamtbewertung den Wert x bekommen.

Man beachte hierbei, dass die Kompromiss-Suche durch die Familie der Kompromissgesamtbewertungen ξ_O bestimmt wird, so wie die Teamformation durch den Teamkonstruktor τ bestimmt wird.

Alle generierten Mengen $KS^i_\xi(e)$ stellen mögliche Teampläne dar.

Lemma 11.22 *Sei ξ_O eine Familie von Kompromissgesamtbewertungen. Für alle Teams G, jeden Index $i \in \mathbb{N}$ und jeden Knoten $n \in B_{K_G} \cup E_{K_G}$ gilt:*

$$KS^i_\xi(n) \subseteq \mathit{Teampläne}(G)$$

Beweis: Der Algorithmus bildet Schnitte $\bigcap_{b \in e^\bullet} KS^i_\xi(b)$ von Teilmengen der lokalen Prozesse $\mathit{WFProc}(D(e)[R(^\bullet e)], \hat{\psi}(e))$, wobei die Baumstruktur des Teams G dazu genutzt wird, die Klammerung festzulegen. Nach Theorem 9.30 und 9.38 bedeutet Schnittbildung von Komponentenprozesse aber nichts anderes als die Berechnung der Prozesse der Komposition. Da die Komposition aller Komponenten $D[R(^\bullet e)]$ nach Definition 10.19 den Teamdienst $D(G)$ ergibt, die die Teamsteuerung $\hat{\psi}(G)$ respektieren und wir nur terminierende Prozesse betrachten, haben wir somit nur Teampläne nach (10.18) konstruiert. q.e.d.

Im Idealfall entsteht durch die rekursive Berechnung der $KS^0_\xi(^\circ K_G)$ an der Spitze des Teams, d.h. an der eindeutig bestimmten Stelle $b_0 \in {}^\circ K_G$, eine Menge von Teamplänen $KS^i_\xi(^\circ K_G)$ mit bestmöglicher Bewertung. Sollte die Menge $KS^0_\xi(^\circ K_G)$ jedoch leer sein, so werden in weiteren Durchläufen dann noch die Pläne $KS^1_\xi(^\circ K_G)$, $KS^2_\xi(^\circ K_G)$ usw. betrachtet, die höchstens um $i \in \mathbb{N}$ vom Maximum abweichen.

Die Kompromissmenge $KS^i_\xi(G)$, die vom Team G generiert wird, ergibt sich dann anhand des kleinsten Index i, für den $KS^i_\xi(^\circ K_G)$ nicht-leer ist:

$$KS_\xi(G) := KS^i_\xi(^\circ K_G), \text{ wobei } \begin{array}{l} KS^i_\xi(^\circ K_G) \neq \emptyset \text{ und} \\ KS^j_\xi(^\circ K_G) = \emptyset \text{ für alle } j < i \end{array} \tag{11.21}$$

Mit dieser verteilten, rekursiven Eingrenzung des Kompromissraums ist die Teamplanung praktisch schon festgelegt, denn alle Pläne einer Kompromissmenge werden durch g_ξ identisch bewertet. Mit der wiederholten Eingrenzung erleichtert sich die Wahl eines Teamplans $\pi_G \in KS_\xi(G)$ enorm, da $KS_\xi(G)$ meist eine sehr kleine Menge ist.

Abbildung 11.23 zeigt die Teamplanung als verteilten Algorithmus. Der Algorithmus verwendet zwei Arten von Nachrichten: $\texttt{req}(n, i)$ und $\texttt{reply}(X, n, i)$ mit $n \in (B_{K_G} \cup E_{K_G})$. Mit der Nachricht $\texttt{req}(n, i)$ wird der n zugewiesene Agent $A(n)$ – mit der Abbildung $A = (Ag \circ O \circ \phi)$ berechnet – aufgefordert, die i-te Annäherung der Kompromissmenge zu berechnen. Mit der Nachricht $\texttt{reply}(X, n, i)$ sendet der Agent $A(n)$ die Menge X – die i-te Annäherung der Kompromissmenge – an seinen Teamvorgesetzten.

// Anforderung zur Teilberechnung an e.
when $A(e)$ receives $\texttt{req}(e,i)$ where $e \in E_{K_G}$ do
    if $e \in {K_G}^\circ$ then
        $KS[e] := WFProc(D(e)[R({}^\bullet e)], \hat{\psi}(e))$, send $\texttt{reply}(KS[e], e, i)$
    else
        reset $A(e)$;
        for all $b \in e^\bullet$ do send $\texttt{req}(b,i)$ to $A(b)$

// Anforderung zur Teilberechnung von b. Wird an e weitergeleitet.
when $A(b)$ receives $\texttt{req}(b,i)$ where $b \in B_{K_G}$ do
    send $\texttt{req}(e,i)$ to $A(e)$ where $b^\bullet = \{e\}$

// Eine Teilberechnung X von einem $b \in e^\bullet$ empfangen.
when $A(e)$ receives $\texttt{reply}(X,b,i)$ where $b \in B_{K_G} \wedge (e,b) \in F_{K_G}$ do
    $X_{A(e)}[b] :=$ X, $rcv_{A(e)}[b] :=$ true

// Teilberechnungen aller $b \in e^\bullet$ zusammenfassen.
wait until $\exists e \in E_{K_G} \setminus {K_G}^\circ : \forall b \in e^\bullet : rcv_{A(e)}[b]$ do
    send $\texttt{reply}(KS[e], e, i)$ to $A(b')$ where ${}^\bullet e = \{b'\}$,

$$\begin{aligned} KS[e] &:= \textstyle\bigcup_{j=0}^{i} KS(m-j) \\ KS(x) &:= \{\pi \in Y \mid g(\pi) = x\} \\ m &:= \max\{g(\pi) \mid \pi \in Y\} \\ g(\pi) &:= \xi_{O(\phi(e))}\big(\{eval_{O(\phi(b))}(\pi) \mid b \in e^\bullet\}\big) \\ Y &:= \textstyle\bigcap_{b \in e^\bullet} X_{A(e)}[b] \end{aligned}$$

// Teilberechnung X von e empfangen.
when $A(b)$ receives $\texttt{reply}(X,e,i)$ where $e \in E_{K_G} \wedge (b,e) \in F_{K_G}$ do
    $KS[b] = X$
    if $b \neq b_0$ where ${}^\circ K_G = \{b_0\}$ then
        send $\texttt{reply}(KS[b], b, i)$
    elseif $X = \emptyset$ then
        reset$(A(b))$; send $\texttt{req}(e_0, i+1)$ to $A(e_0)$ where ${b_0}^\bullet = \{e_0\}$
    else
        $result = KS[b_0]$

---

init A is if $A = A(b_0)$ where ${}^\circ K_G = \{b_0\}$ then
        result $= \emptyset$; reset (A);
        send $\texttt{req}(e_0, 0)$ to $A(e_0)$ where ${b_0}^\bullet = \{e_0\}$

---

reset(A) is for all $b \in B_{K_G}$ do $X_A[b] = \emptyset$, $rcv_A[b] =$ false
        for all $n \in Ag^{-1}(A)$ do $KS[n] = \emptyset$

Abbildung 11.23: Teamplanung als verteilter Algorithmus

Jeder Agent A besitzt für die ihm zugewiesenen Knoten des Teamnetzes, d.h. für alle $n \in Ag^{-1}(A)$ die Variablen $KS[n]$, die die in der i-ten Runde berechneten Kompromissmengen $KS^i_\xi(n)$ enthalten. Zu jeder Stelle $b \in B_{K_G}$ existieren die Variablen $rcv_A[b]$, die speichert, ob von b schon die Teilberechnung geliefert wurde. In diesem Fall ist der berechnete Wert in der Variablen $X_A[b]$ gespeichert.

Der Agent an der Wurzel $A(b_0)$ für ${}^\circ K_G = \{b_0\}$ besitzt als einziger zudem noch die Variable result, die bei der Termination die Kompromissmenge $KS_\xi(G)$ enthält.

11.5.4 Konstruktion eines Sonar-MAS

Aus der Sicht des Agent A^b, dem die Aufgabe b zur Bearbeitung zugewiesen wurde, wird die Auswahl nicht unter den Elementen, die der Teambildungsalgorithmus betrachtet:

$$\phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A^b),$$

sondern unter den Elementen seiner Präferenz:

$$\Delta_{A^b}(b)$$

getroffen. Um ein an die Organisation angepasstes Multiagentensystem zu erhalten, konstruieren wird Δ_A und δ_A derart, dass diese beiden Sichtweisen gerade zusammenfallen.

Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ eine wohlgeformte Organisation. In einer MAS-Organisation (Org, Ag) sind die notwendigen Rollenfähigkeiten ρ_A, die Teamgeneration γ_A und die Handlungsmöglichkeiten Δ_A, δ_A durch die Organisation implizit festgelegt.

Definition 11.23 *Eine MAS-Organisation (Org, Ag) mit $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ heißt* wohlgeformt*, wenn für jeden Positionsgagenten A_O mit $O \in \mathcal{O}$ ein Teamkonstruktor τ_{A_O} existiert, für den folgendes gilt:*

1. *Die benötigten Rollenfähigkeiten ρ_{A_O} ergeben sich anhand der A_O zugeordneten Transitionen:*

$$\rho_{A_O}(D_0) = \{R({}^\bullet t) \mid t \in Ag^{-1}(A_O) \cap T, D(t) = D_0, t^\bullet = \emptyset\}$$

2. *Die Teamgeneration $\gamma_{A_O} : \mathcal{R} \to \mathcal{G}$ geschieht anhand des Teamplanungsalgorithmus.*

$$\gamma_{A_O}(R) = G(K_{\tau_{A_O}}(N, R))$$

3. *Die Verhaltensregelmäßigkeiten $\Delta_{A_O}(G)(b)$ ergeben sich anhand der A_O zugeordneten Transitionen. Definiere für alle $b \in B_G$:*

$$\begin{aligned}\Delta_{A_O}(G)(b) = \{ \quad & (D(t), \{(R(p), A_p) \mid p \in t^\bullet\}) \\ \mid \quad & t \in (T \cap \phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A_O)), \forall p \in t^\bullet : A_p \in \mathcal{A}_{dlg}(p)\}\end{aligned}$$

4. *Die Handlungsmöglichkeiten $\delta_{A_O}(G)(\Delta)(b)$ ergeben sich anhand des Teams G. Definiere für alle $b \in B_G$:*

$$\delta_{A_O}(G)(\Delta)(b) := (D(\phi(e)), \{ \quad (R(\phi(b')), A_{O(\phi(e'_b))}) \mid \\ (b, e) \in F_G, \forall b' \in e^\bullet : (b', e'_b) \in F_G\})$$

   Beachte, dass im Team G zu jedem b der Nachfolger e eindeutig bestimmt ist, ebenso wie zu jedem $b' \in e^\bullet$ das e'_b.

5. *Der Handlungsplan muss ein beliebiger Teamplan sein, d.h. ein Kompromiss, der die Steuerbedingung erfüllt:*

$$\pi_{A_O}(G)(D)(p) \in KS_\xi(G)$$

   Die Definition einer wohlgeformten koordinierenden Organisation stellt sicher, dass ein solcher Prozess stets existiert.

Durch *Org* sind mit Definition 11.23 die Abbildungen ρ und Δ und durch τ sind γ und δ konstruktiv festgelegt. Durch $\hat{\psi}$ und ξ wird π eingeschränkt, im allgemeinen jedoch nicht festgelegt. Der zu Position gehörende Agent wird daher erst durch die Abbildung *Ag* eindeutig festgelegt.

Jede wohlgeformte MAS-Organisation (Org, Ag) generiert eine Klasse an SONAR-MAS $\mu(Org, Ag)$. Es zeigt sich deutlich, dass die Agenten eines generierten SONAR-MAS die *formale* Organisation modellieren, denn sie entsprechen exakt den Anforderungen der Organisationen, mit anderen Worten: Sie sind mit ihr identisch.

Generierte SONAR-MAS sind praktisch relevant, da sie stets wohlgeformte Multiagentensysteme darstellen und alle gebildeten Prozesse Teams darstellen.

Theorem 11.24 *Die von einer wohlgeformten MAS-Organisation (Org, Ag) generierten* SONAR*-MAS in $\mu(Org, Ag)$ sind wohlgeformt.*

Beweis: In jedem SONAR-MAS aus $\mu(Org, Ag)$ ist jedem $O \in \mathcal{O}$ der Agent A_O zugeordnet. Nach Definition 10.26 sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

1. A_O kennt nur Teampartner, die durch die Verhaltensregelmäßgkeiten $\Delta_{A_O}(G)(p)$ über die Organisationsstruktur erzeugt werden, wobei nach Konstruktion nur Agenten aus der Menge $\{Ag(O) \mid O \in \mathcal{O}\}$ verwendet.

2. A_O vefügt nach Konstruktion für jede finale Tätigkeit t über die benötigten Fähigkeiten $\rho(D(t))$.

3. Der Handlungsplan ist nach Konstruktion immer ein Prozess, der die Steuerbedingung erfüllt.

Also gilt Wohlgeformtheit. q.e.d.

Ob das Multiagentensystem das Team G akzeptiert, hängt von der Auswahl der Verhaltensregelmäßgkeiten ab. Im jedem Schritt des Algorithmus wählt

$Ag(O(\phi(b)))$ eine Transition t als Verlängerung von b. Dies ist gleichbedeutend mit der Auswahl einer Verhaltensregelmäßgkeit:

$$\delta := \delta_A(G)(\Delta)(p) = (D, \{(R_1, A_1), \ldots, (R_n, A_n)\})$$

Nach Konstruktion (Definition 11.23) passt Δ_A und δ bereits zu Struktur von G, so dass wir folgende Aussage erhalten:

Theorem 11.25 *Sei $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ eine wohlgeformte Organisation und sei $R \in \mathcal{R}$, $p \in Start_{Org}(R)$ und $\{p\}$ bearbeitbar.*

Wenn τ ein Teamkonstruktor ist, dann wird jedes vom Teambildungsalgorithmus generierte Team $G(K_\tau(N, p))$ auch vom generierten Sonar*-MAS akzeptiert.*

Beweis: Nach Theorem 11.18 hat der Algorithmus 11.19 die Option zu terminieren, so dass mindestens ein Team $G(K_\tau(N, p))$ vom Teambildungsalgorithmus generiert wird.

Es sind zwei Eigenschaften zu zeigen:

1. Die Subteams passen zusammen: Dies gilt aufgrund der Konsistenzforderung (11.16) des Teamkonstruktors.

2. Die Teamzuweisungen entsprechen den individuellen Präfenzen aller Agenten, d.h. für alle $(b, e) \in F_G$ muss gelten:

   $$\delta_{A(e)}(G)(\Delta)(b) = (D_G(e), \{(R_G(b'), A_G(e(b'))) \mid b' \in e^\bullet\})$$

   Dies gilt, da nach Konstruktion im generierten Sonar-MAS gilt:

   $$\begin{array}{ll} & \delta_A(G)(\Delta)(b) \\ = & (D(\phi(e)), \{(R(\phi(b')), Ag(O(\phi(e'_b)))) \mid (b, e) \in F_G, \forall b' \in e^\bullet : (b', e'_b) \in F_G\}) \\ = & (D_G(e), \{(R_G(b'), A_G(e'_b) \mid (b, e) \in F_G, \forall b' \in e^\bullet : (b', e'_b) \in F_G\}) \\ = & (D_G(e), \{(R_G(b'), A_G(e(b')) \mid (b, e) \in F_G, b' \in e^\bullet\}) \end{array}$$

   Die erste Umformung ergibt sich, weil die Gruppe aus (K, ϕ) konstruiert wird $(G(K, \phi))$, so dass $R_G = R \circ \phi$, $D_G = D \circ \phi$ und $A_G = Ag \circ O \circ \phi$ gilt. Nutzen wir dann aus, dass die Nachbedingung von b' eindeutig bestimmt ist, so erhalten wir die zweite Umformung.

q.e.d.

Das Theorem zeigt, dass für ein wohlgeformtes generiertes Sonar-MAS die Teamauswahl nicht eingeschränkt ist, da – im Gegensatz zu beliebigen Multiagentensystemen – alle Teams akzeptiert werden. Somit sind generierte Sonar-MAS besonders geeignet, als Vorstrukturierung der Teamprozesse eines Multiagentensystems zu dienen.

Wir erhalten aus Theorem 11.25 als Korrolar die Aussage, dass generierte Multiagentensysteme organisiert sind.

Theorem 11.26 *Sei (Org, Ag) eine wohlgeformte MAS-Organisation, dann ist jedes generierte* Sonar*-MAS aus $\mu(Org, Ag)$ organisiert.*

Beweis: Jedes generierte SONAR-MAS in $(\mathcal{A}_\mu, \mu) = \mu(Org, Ag)$ hat nach Konstruktion in Definition 11.23 nur Teamnetze, die von der Netzstruktur der organisation *Org* erzeugt wird: $\mathcal{G} = \mathcal{G}(Org)$. Nach Theorem 11.25 werden außerdem alle Teamnetze vom Multiagentensystem akzeptiert: $\mathcal{G}(Org) = \mathcal{G}_{akz}(\mathcal{A}_\mu, \mu)$. Damit ist jedes MAS aus $\mu(Org, Ag)$ im Sinne von Definition 11.10 organisiert. q.e.d.

Zusammenfassung

Organisationen generieren konstruktiv ein SONAR-MAS, das sich sehr gut zur Vorstrukturierung der Teamprozesse eines Multiagentensystems eignet. Diese Eigenschaft folgt aus der Tatsache, dass alle Prozesse der Organisation ein zugelassenes Team generieren. Ebenso ist von Interesse, dass sich aus einer formalen Organisation stets ein wohlgeformtes Multiagentensystem ableiten lässt. Abbildung 11.24 fasst die Beziehungen zwischen Organisation, Team und Multiagentensystem zusammen.

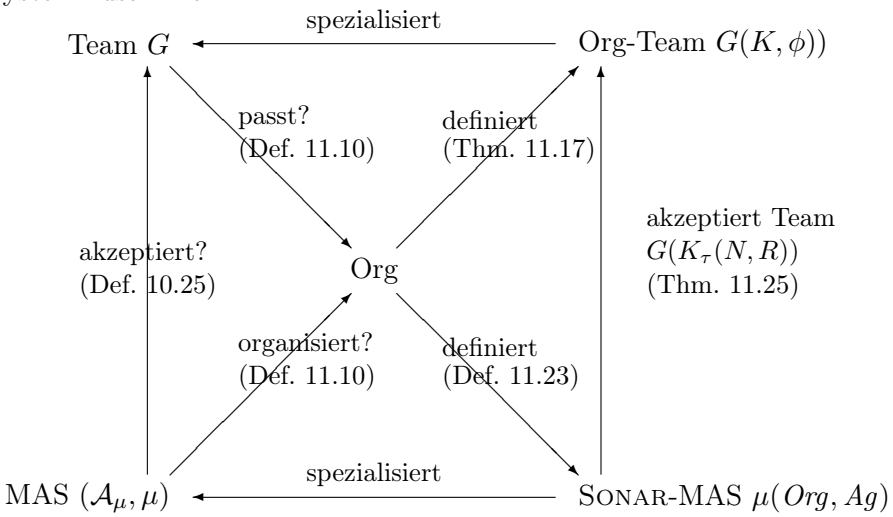


Abbildung 11.24: Beziehungen zwischen Organisation, Team und Multiagentensystem

An dieser Stelle zeigt sich, dass das Modell der formalen Organisation hilft, organisationale Planung auf der strategischen, der taktischen und der operationalen Ebene zu unterstützen (vgl. Abb. 11.25). Die Organisationsstruktur bildet

Organisationale Planung	Modellelement
strategische Ebene	Organisationsstruktur *Org*
taktische Ebene	Teamformation G
operationale Ebene	Teamplanung π_G

Abbildung 11.25: Die Aktivitätsebenen der organisationalen Planung

die *strategische Ebene* der Planung. In ihr werden die Grundstrukturen der bearbeitbaren Rollen, der Delegationspfade usw. festgelegt. Die Teamformation auf Basis der Prozessabwicklung des Organisationsnetzes stellen die *taktische Ebene* dar. Hier wird zu einer gegebenen Situation festgelegt, wie ein Team G zusammengestellt wird, das sich der Aufgabe annimmt. Die Auswahl eines Teamplanes, d.h. eines Dienstnetzprozesses π_G in Abhängigkeit zur organisationalen Steuerung ψ stellt die *operationale Ebene* dar. Hier wird entschieden, wie innerhalb des Teams Rollen in konkreten Aktionen ausgefüllt werden.

In Kapitel 9 haben wir bereits festgestellt, dass Rollenkomponenten von Dienstnetzen eine Spezifikation der mit einer Rolle verbundenen Rechte und Pflichten darstellen. Organisationen definieren durch ihre Positionen in ganz ähnlicher Weise ebenfalls Rechte und Pflichten – diesmal aber für die Positionen, die man sich als Bündelung von Rollen vorstellen kann. Die Rechte einer Position definieren sich über die Delegationsmöglichkeiten. Ihre Pflichten sind über die Rollen $R(O)$ definiert, d.h. über diejenigen Rollen, welche die Position O ausfüllen muss.

Betrachten wir nun, wie ein SONAR-MAS seine eigene Struktur zur Laufzeit verändern kann.

12 Sozionisches Modell reflexiver, selbstorganisierter Koordinierung

Bislang haben wir Organisationen als kontextuelle Strukturen begriffen, welche die Prozesse des Multiagentensystems rahmen. In diesem Abschnitt betrachten wir – aufbauend auf (Köhler-Bußmeier u. a., 2009) – Organisationen als Agierende. Während sich bislang Prozesse eines Multiagentensystems als Reaktion auf externe Situationen darstellten, betrachten wir nun Reaktionen auf interne Situationen. Diese Prozesse der Organisation haben demnach sich selbst zum Gegenstand, sind also reflexiv. Damit verbunden ist die Absicht, das die Organisation durch Anpassung sich selbst verbessert (vgl. auch Turner und Jennings, 2001; Panzarasa und Jennings, 2001; Glaser und Morignot, 1997; Kirn und Gasser, 1998; Schillo, 2003).[1]

12.1 Reorganisation als organisationale Aktivität

Wie unterscheiden Organisationsprozesse erster und zweiter Ordnung. Die Organisationsprozesse *erster Ordnung* betreffen das Zusammenspiel des Teams (engl. team work). Soll eine Aufgabe realisiert werden, so wird ein Team generiert, und jeder Positionsagent, der Teil des Teams ist, führt seinen Teil des gemeinsamen Teamplans aus. Teamplanung ist ein Organisationsprozess, der die Organisation – zumindest für den Moment der Teamgenese – als statisches Gebilde auffasst. Die Organisation ist der Kontext, innerhalb dessen sich Teamprozesse vollziehen.

Für Organisationsprozesse *zweiter Ordnung* ist die Organisation dagegen selbst Gegenstand des Prozesses. Es handelt sich um Reorganisationprozesse, die eine Organisation transformieren. Diese autopoetischen Reorganisationprozesse stößt die Organisation aufgrund interner Zustände an. Für Organisationsprozesse zweiter Ordnung sind Organisationen also die Variable. Organisationsprozesse zweiter Ordnung sind also, indem sie sich mit sich selbst beschäftigen, reflexiv.

An dieser Stelle kann man den Akteurscharakter der Organisation herausstellen, denn indem die Organisation reflexiv auf ihre eigenen Zustände Bezug nimmt und diese verändert, tritt sie als Akteur auf. Da die Reorganisation sich regelhaft auf interne Zustände bezieht, kann man in diesem Zusammenhang sogar von der Lernfähigkeit einer Organisation sprechen.

Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass die Transformationsprozesse nicht als unmittelbares Ergebnis der Aktivitäten der Organisationsmitglieder zu verstehen sind, denn die Organisation reagiert auf ihre internen Zustandsverände-

[1] Zu ersten Experimenten in Bezug auf die Verbindung der Variablen *Organisationsstruktur* und *Akteurshandeln* siehe (Shoham und Tennenholtz, 1994) und (Walker und Wooldridge, 1995). Zur Mikro-Makro-Dualität in Multiagentensystem siehe auch (Schillo u. a., 2000).

rungen, nicht aber auf das Verhalten der Organisationsmitglieder, die ursächlich die Zustandsveränderungen herbeigeführt haben. Die Organisation ist sogar als autonomer Akteur zu verstehen, denn die Reaktion auf Zustandsveränderungen erfolgt nach eigenen Regeln. Kurzgefasst: Die Organisation ist operational geschlossen.

Die Organisationsprozesse erster und zweiter Ordnung sind nicht unabhängig, sondern vielmehr wechselseitig aufeinander bezogen. Die Organisation tritt sowohl als Koordinator als auch als Koordinierter auf. Bei jedem Koordinierungsprozess sind sowohl Koordinator als auch Koordinierte einem wechselseitigem Anpassungsprozess unterworfen. Wir kennen diese Gedankenfigur allgemein auch für soziale Systeme, genauer für die wechselseitige Verflechtung der Akteure mir der sozialen Struktur, bei denen jede Struktur mit einer Kontrolle einhergeht. Diese Kontrolle dient den Akteuren der Sicherung ihres eingebrachten Kapitals, ihrem Investionswert, und dies wird meist von Anerkennungs- und Sanktionierungsmaßnahmen flankiert.

Ein einfaches Beispiel für den reflexiven Charakter der Organisationsprozesse ist die Generierung einer modifizierten Steuerung ψ als Ergebnis einer Gruppeninteraktion (vergleiche dazu Abbildung 12.1). Die Organisation beeinflusst zum einen die Akteure, denn sie rahmt als Koordinator mit der Steuerung ψ den Plan jedes Teammitglieds, denn jedes Mitglied $i \in \{1, \ldots, n\}$ muss einen Plan wählen, der die Steuerungsbedingung erfüllt. Die Auswahl des Teams hat Auswirkungen auf die Organisationsmitglieder, da diese ihre Strukturen gegebenenfalls so reorganisieren, dass sie zu den Steuerungsbedingungen passen.[2] Es gilt zudem noch, dass sich das Team G auf einen gemeinsamen Teamplan π_G, d.h. ein Prozess des Teamnetzes $D(G)$, einigen muss, der die globale Steuerbedingung $\hat{\psi}(G)$ des Teams erfüllt. Außerdem muss der Teamplan π_G einen korrekten Ablauf des Dienstes beschreiben, d.h. er muss auch teminieren, ohne dass im Dienstnetz noch Marken verbleiben (vgl. Definition 10.26). Zum anderen beeinflussen die Akteure aber auch die Organisation, indem jene bewirken, dass sie die Steuerungsbedingungen anpasst. Dies ist notwendig, damit die Einigung eines Teams auf einen gemeinsamen Plan nicht zu aufwendig wird. Um den Suchraum zu begrenzen ist es wünschenswert, dass die Steuerungsbedingungen so beschaffen sind, dass sie die korrekte Termination implizieren. Dabei bietet es sich für die Organisation an, bei der Modifikation der Steuerung $\psi \rightsquigarrow \psi'$ an der Teamplanung zu orientieren, d.h. die Steuerung so zu modifizieren, dass sie mit den Konfliktvermeidungsstrategien der Organisationsmitglieder zusammenfällt.

Auf diese Art und Weise generieren die Handlungen der Organisationsmitglieder die Organisationstrukturen, die später als Steuerungsbedingungen auf sie einwirken. Es gilt also, dass sich sowohl die Organisationsmitglieder als auch die Organisation, repräsentiert durch ihre Positionsagenten, *wechselseitig* einander anpassen. Man beachte, dass sich die wechselseitige Beeinflussung von Mitgliedern und Organisation in unserem Modell zu einer gewöhlichen Position/Position-Relation, also zu einer Agent/Agent-Beziehung reduziert, da die Akteure und die Organisation als Ausprägungen des gleichen Konzeptes gesehen werden.

[2] Zum Verhältnis von Organisation und Organisationsmitglied siehe Kapitel 13.

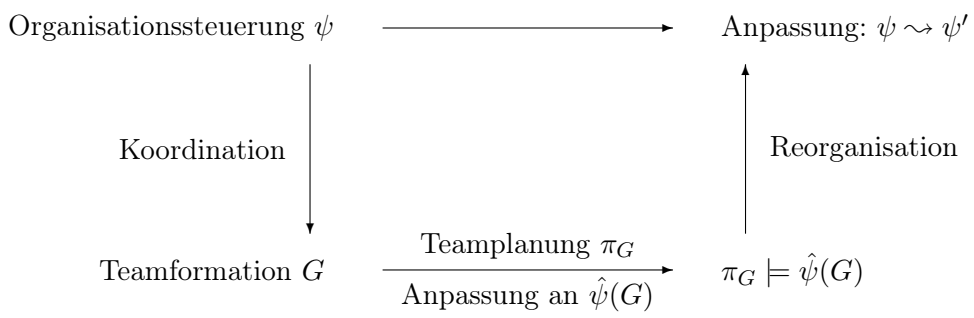


Abbildung 12.1: Rekursive Koordination

Wie in Kapitel 8 diskutiert ist der Unterschied zwischen Mikro- und Makroelementen eher inhaltlicher Natur, denn ihrer Struktur nach sind sie weitesgehend identisch. Die strukturelle Ähnlichkeit erlaubt es uns, einen neuen Blick auf die Modelle einzunehmen, bei dem Positionsagenten und „normale“ Agenten konzeptionell nicht unterschieden werden. Diese Vereinheitlichung hilft uns, Konzeptlücken zu schließen, die von den jeweiligen Metaphern bedingt sind. Die Metapher des Agenten impliziert eine Betonung des Handelns, des Planens etc. Sie verschließt sich dagegen tendenziel strukturellen Ansätzen. Umgekehrt impliziert die Metapher der Organisation Statik, die blind gegenüber möglichen Veränderung ist.

Eine Analyse der Gemeinsamkeiten zeigt, dass beide Sichtweisen ein gemeinsames Modell zugrundeliegt, das die aktionististischen wie die strukturellen Elemente gleichermaßen enthält. Wir erkennen, dass es sich bei diesem Vorhaben um die konstruktivistische Wendung der soziologischen Betrachtung aus Kapitel 8 handelt. Die rekursive Form des Entitätenmodells korrespondiert zum rekursiven Bezug der SONAR-Agenten, die sowohl Mikro- als auch Makrocharakter besitzen.

Pointiert formuliert handelt es sich bei den Organisationsprozesse erster Ordnung um *selbstorganisierte Koordinierungsprozesse* und bei denen zweiter Ordnung um *Prozesse koordinierter Selbstorganisation*. Die Mikro-/Makro-Dualität zeigt sich hier im Akzent: Im Falle selbstorganisierte Koordinierung betrachten wir den Koordinierungsprozess aus der Perspektive der koordinierten Einheiten, im Falle koordinierter Selbstorganisation aus der Perspektive der koordinierenden Einheit.

Interessante Konstellationen sind gerade solche, bei denen die Anpassung der einen Seite vernachlässigt werden kann. Interessant sind hier also die beiden Extreme. Wird beispielsweise innerhalb des Prozesses der Koordinator erst generiert, so ist diese Dynamik von größerem Interesse als die daraus resultierende Koordinierung. Wird dagegen ein bestehendes Protokoll eingesetzt, um den Prozess zu koordinieren, so kann die Koordinationsstruktur näherungsweise als statisch angesehen werden, und die koordinierten Akteure rücken in den Mittelpunkt.

12.2 Reorganisation durch Organisationstransformationen

Im folgenden konzeptionalisieren wir Reorganisationsprozesse als Transformationen, die eine formale Organisation auf eine andere abbildet. In diesem Kapitel wollen wir zunächst die Organisation als ganzes betrachten, d.h. wir gehen davon aus, dass wir eine globale Sicht auf das System besitzen, um Reorganisationen vorzunehmen. Eine lokale Sichtweise, bei der die Modifikation die Organisationsstruktur durch Anpassung der Positionsagenten erfolgt, ist Gegenstand des nachfolgenden Kapitels 12.4.

Wir betrachten nun (ähnlich wie Rinderle-Ma und Reichert, 2007) Transformation auf Organisationen. Eine Transformation bildet eine MAS-Organisation auf eine weitere ab. Die Transformation bezieht sich im allgemeinen auf das Organisationsnetz N, auf die Organisationsstruktur $\mathcal{O}$, auf die Rollenzuweisung $R : P \to \mathcal{R}$, auf die Dienstnetzzuweisung $D : T \to \mathcal{D}$, auf die Prozesssteuerung ψ und auf die Agentenzuweisung $Ag : \mathcal{O} \to \mathcal{S}$:

$$(N_1, \mathcal{O}_1, R_1, D_1, \psi_1, Ag_1) \mapsto (N_2, \mathcal{O}_2, R_2, D_2, \psi_2, Ag_2)$$

Transformationen heißen nebenläufig, wenn sie sich auf disjunkte Teile der Organisation beziehen. Wenn die Transformationen f_1 und f_2 nebenläufig sind, dann ist $f_1 \oplus f_2$ eine Transformation, die den gemeinsamen Effekt der Einzeltransformationen beschreibt.

Definition 12.1 *Zwei Transformationen f_1 und f_2 heißen nebenläufig, wenn gilt:*

$$(f_1(x) \neq x \Longrightarrow f_2(x) = x) \wedge (f_2(x) \neq x \Longrightarrow f_1(x) = x)$$

Die Summe $f_1 \oplus f_2$ zweier nebenläufiger Transformation ist folgendermaßen definiert:

$$(f_1 \oplus f_2)(x) = \begin{cases} f_1(x), & \textit{falls } f_1(x) \neq x, f_2(x) = x \\ f_2(x), & \textit{falls } f_1(x) = x, f_2(x) \neq x \\ x, & \textit{sonst} \end{cases}$$

Mit $\mathcal{ORG}$ bezeichnen wir die Menge aller Organisationen. Wir nehmen an, dass die Stellenmenge P aller Organisationen in $\mathcal{ORG}$ Teilmenge einer universellen Stellenmenge $\mathcal{P}_u$ ist und dass die Transitionsmenge T Teilmenge einer universellen Menge $\mathcal{T}_u$ ist. Damit vermeiden wir, dass ein Element x in einem Organisationsnetz eine Stelle beschreibt, in einem anderen dagegen eine Transition. Die hier eingeführte Konvention ist daher lediglich eine Typisierung und keine prinzipielle Einschränkung. Eine Transformation f ist dann eine Abbildung von der Menge $\mathcal{ORG}$ auf sich selbst:

$$f : \mathcal{ORG} \to \mathcal{ORG}$$

Mit $\mathcal{TM}$ bezeichnen wir die Menge aller Transformationen.

Transformationen sind verkettbar, d.h. wenn f_1 und f_2 zwei Transformationen sind, dann ist auch $f_1(f_2(Org, Ag))$ eine. Mit der identischen Transformation

haben wir damit die Kategorie der Organisationstransformation mit den Organisationen $\mathcal{ORG}$ als Objekten und den Transformationen $\mathcal{TM}$ als Morphismen.

Wir betrachten nur *wohlgeformte Transformationen*, d.h. Transformationen auf Organisationen, die eingeschränkt auf wohlgeformte Organisationen einen Abschlußoperator darstellen, d.h. die eine wohlgeformte Organisation auf eine solche abbilden.

12.3 Elementare Tranformationen

Es gibt unendlich viele Transformationen, da es unendlich viele MAS-Organisationen gibt. Um eine unendlich Menge von Transformationen endlich zu beschreiben, gehen wir davon aus, dass es eine endliche Menge an Transformationsmustern gibt, die diese Klasse von Transformationen definiert. Eine Organisationstransformation bildet Netze, also spezielle Graphen, mit Anschriften aufeinander ab. Wir können also *Graphersetzungssysteme* verwenden, um die Transformationen darzustellen (vgl. Padberg u. a., 1995, 1998; Hoffmann u. a., 2005). Graphersetzungssysteme verallgemeinern Termersetzungssysteme in dem Sinne, als dass Termersetzungssysteme nur auf speziellen Graphen, nämlich den Termbäumen operieren, während Graphersetzungssysteme beliebige Graphen betrachten. Die Regeln eines Graphersetzungssystems erlauben es, einen Teilgraphen in einem beliebigen Kontext zu substituieren. Da der Kontext beliebig ist, kann eine solche Regel auf unendlich viele Instanzen angewendet werden.

Die Regeln eines Graphersetzungssystems bilden somit eine Menge der gesuchten Muster. Da jede Regel eine Teilgraphen in einem beliebigen Kontext substituieren kann, ist sie auf unendlich viele Instanzen anwendbar. Dabei ist es nicht notwendigerweise so, dass jede beliebige Regelmenge die Menge aller Transformationen generiert. Im allgemeinen generiert sie nur eine Teilmenge aller möglichen Transformationen. Dies ist typischerweise auch gewollt, denn Organisationstransformationen können unterschiedlich schwer zu implementieren sein, unterschiedliche Kosten verursachen usw., so dass man sich auf solche Transformationen einschränkt, die gute Eigenschaften besitzen.

Wir studieren nun einige Transformationsmuster, die entweder naheliegend sind oder die geeignet sind, wohlgeformte Organisationen in solche zu überführen. Die Anpassungen beziehen sich dabei sowohl auf das Organisationsnetz, d.h. wir nehmen Transformationen auf der Graphenstruktur des Netzes vor, als auch auf die Anschriften R, D und ψ sowie die Organisationsstruktur $\mathcal{O}$.

Vergröberung und Verfeinerung von Positionen Bereits in Definition 11.5 haben wir das Konzept der Vergröberung für Positionsmengen definiert. Jede Vergröberung ist eine Transformation, ebenso wie die dazu inverse Transformation, die Verfeinerung. Diese Transformation ist in Abbildung 12.2 skizziert.

Vergröberung und Verfeinerung von Tasks Eine Verfeinerung einer Tätigkeit t kann sinnvoll sein, falls die Menge der zugelassenen Prozesse $\psi(t)$ in zwei Teile zerfällt: $\psi(t) = \psi_1 \vee \psi_2$ mit $D(t_1) = D(t_2) = D(t)$. In diesem Fall bestehen eigentlich zwei Aufgabenbereiche, die durch die zwei Tätigkeiten t_1 und t_2 mit

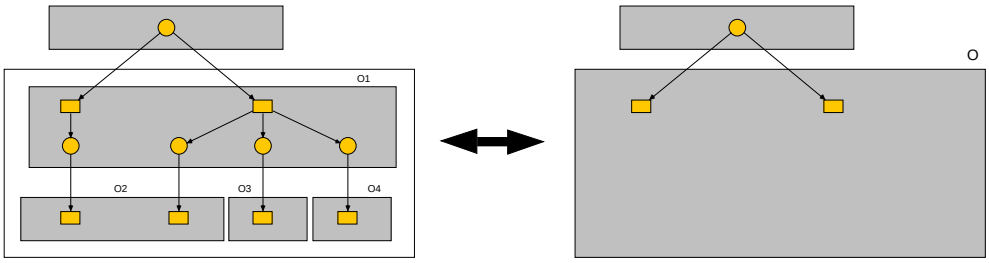


Abbildung 12.2: Vergröberung der Position

$\psi(t_1) = \psi_1$ und $\psi(t_2) = \psi_2$ realisiert werden können. Umgekehrt können so zwei Transitionen mit gleichem Dienstnetz und gleichem Nachbereich zu einer Transition zusammengefasst werden. Dies ergibt die inverse Transformation. Diese Transformation ist in Abbildung 12.3 skizziert.

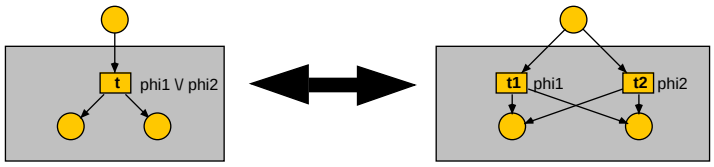


Abbildung 12.3: Transformation der Steuerung

Aufspaltung und Verschmelzung von Positionen Eine Position O, die aus zwei Mengen besteht: $O = O_1 \cup O_2$ mit $O_1 \cap O_2 = \emptyset$, kann auf die beiden Positionen aufgeteilt werden, wenn sie sich gegenseitig nicht nutzen d.h. wenn gilt:

$$(T \cap O_i)^\bullet \subseteq O_i \quad \text{für } i = 1, 2$$

Diese Transformation ist auch invers sinnvoll. Sie beschreibt die Verschmelzung zweier Positionen. Diese Transformation ist in Abbildung 12.4 skizziert.

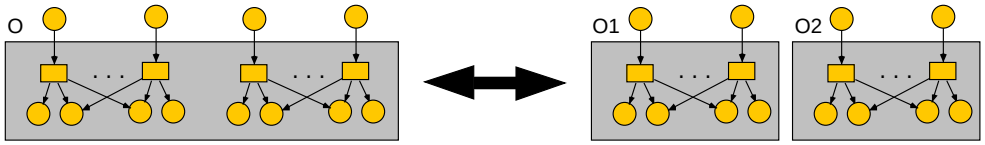


Abbildung 12.4: Transformation der Position

Umlenken von Delegationsbeziehungen Wenn wir eine Delegationsbeziehung zwischen O_1 und O_2, d.h. eine Kante (p_1, t_2) modifizieren wollen, dann ist es für den Erhalt der Wohlgeformtheit wichtig, dass die Aufgabe p_1 weiterhin bearbeitbar ist, d.h. es muss mindestens eine weitere Transition $t \in p_1{}^\bullet$ geben, die die Aufgabe von t_2 übernehmen kann. Außerdem darf durch das Entfernen

der Kante (p_1, t_2) die Transition nicht isoliert werden, d.h. wir müssen ${}^\bullet t \neq \emptyset$ sicherstellen, d.h. es muss eine weitere Stelle p existieren, deren Aufgabe durch t_2 bearbeitet werden kann. Zu dieser fügen wir dann die Kante (p, t_2) ein. Die Delegationsbeziehung (p_1, t_2) wird so zur Relation (p, t_2). Die Beziehung wird also nur umgelenkt. Diese Transformation ist in Abbildung 12.5 skizziert.

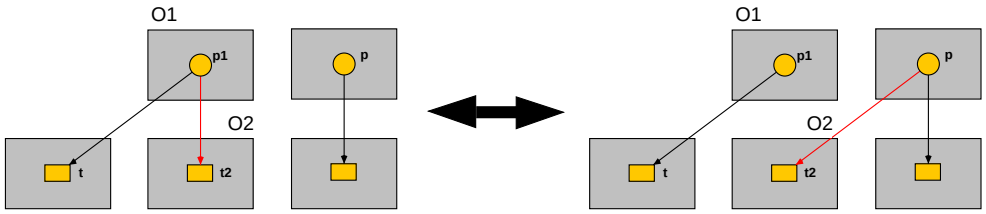


Abbildung 12.5: Transformation der Delegationsbeziehungen

Generieren und Löschen von Delegationsbeziehungen Eine Alternative zum Umlenken von Delegationsbeziehung zwischen O_1 und O_2 ist das Löschen, bzw. invers dazu: das Generieren. Soll eine Kante (p_1, t_2) gelöscht werden, dann ist es weiterhin notwendig, dass die Aufgabe p_1 weiterhin durch mindestens eine weitere Transition $t \in p_1{}^\bullet$ bearbeitbar bleibt. Nach dem Entfernen der Kante besitzt die Transition t_2 einen leeren Vorbereich. Besitzt sie auch einen leeren Nachbereich, so können wir sie direkt löschen. Ist dies nicht der Fall, so ist darauf zu achten, dass für jede Stelle $p \in t_2{}^\bullet$ eine alternative Transition $t_p \in {}^\bullet p$ existiert, damit keine Stellen mit leerem Vorbereich existieren. Stellen mit leerem Vorbereich sind zwar nicht verboten, aber wir wollen auch noch die Initialitätseigenschaft (10.5) erfüllen, d.h. für alle Stellen $p \in P_N$ mit ${}^\bullet p = \emptyset$ gilt $\forall t \in p^\bullet : R(p) = R(D(t))$. Diese Transformation ist in Abbildung 12.6 skizziert.

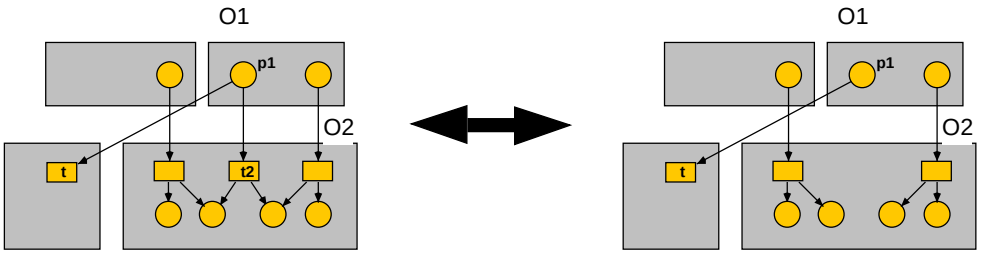


Abbildung 12.6: Löschen/Einfügen der Delegationsbeziehungen

Generieren/Löschen von Tätigkeiten und Aufgabenprofilen Eine weitere Transformation besteht darin, neue Tätigkeiten und Aufgabenprofile zu generieren. Wir können in die Position O eine neue Tätigkeit t hinzufügen, wenn es bereits eine Stelle p gibt, deren Rollenprofil t realisieren kann. Ist die Transition t ihrerseits delegierend, d.h. $t^\bullet \neq \emptyset$, dann müssen alle $p_i \in t^\bullet$ mit bereits bestehenden Transitionen verknüpft werden, damit die Wohlgeformtheit gewahrt bleiben

kann. Darüberhinaus sind natürlich noch die Bedingungen an die Rollen- und Verhaltensverfeinerung zu beachten. Diese Transformation ist in Abbildung 12.7 skizziert.

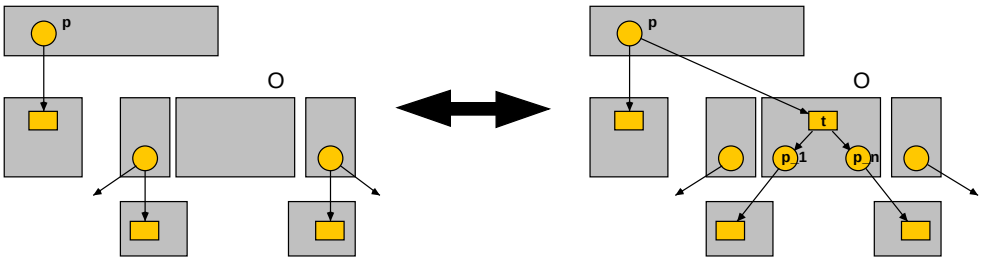


Abbildung 12.7: Löschen/Einfügen von Tätigkeiten und Aufgabenprofilen

12.4 Selbstorganisation durch Transformationsteams

Betrachten wir zunächst, wie sich das Verhältnis von Organisation und generierten SONAR-MAS sich durch eine Transformation verändert. Eine Reorganisation durch eine Organisationstransformation ist konzeptionell zentralisiert, denn wenn wir die Transformation $(Org_1, Ag_1) \mapsto (Org_2, Ag_2)$ vornehmen, dann verändert sich auch die davon generierte Klasse der SONAR-MAS von $MAS_1 = \mu(Org_1, Ag_1)$ zu $MAS_2 = \mu(Org_2, Ag_2)$. Es ist also notwendig, ein globales Modell der Organisation zu verwalten, das transformiert wird und von dem sich dann das veränderte Multiagentensystem ableiten lässt (vgl. dazu die obere, rechte Hälfte der Abbildung 12.8).

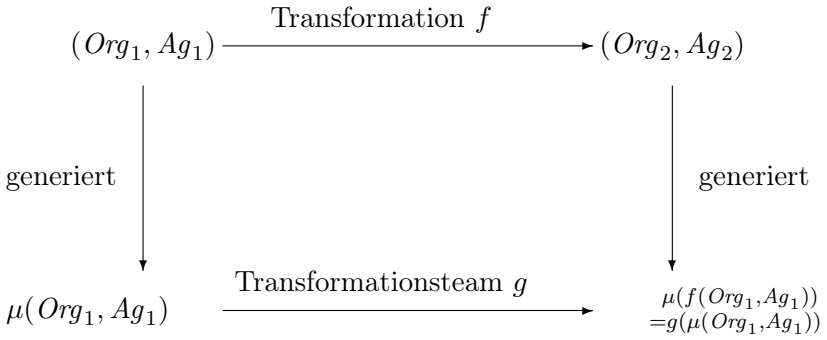


Abbildung 12.8: Zentrale versus dezentrale Transformation

In diesem Abschnitt entwickeln wir erweiternd eine denzentralisierte Perspektive auf die Organisationstransformation. Die Organisation (Org_1, Ag_1) generiert initial die SONAR-MAS Klasse $MAS_1 = \mu(Org_1, Ag_1)$. Die Organisationsstruktur liegt dann verteilt im Multiagentensystem vor. Um eine denzentralen Transformation vorzunehmen wird diese Organisationsstruktur nicht rekonstruiert – stattdessen transformieren die Agenten des SONAR-MAS MAS_1, so dass

ein modifiziertes System $MAS_2 = g(MAS_1)$ generiert wird. Diese Transformation findet kooperativ in einem *Transformationsteam* statt (vgl. dazu die untere, linke Hälfte der Abbildung 12.8).

Ziel ist es dabei, dass die beteiligten Agenten ihre Präferenzen so anpassen, dass die *lokalen* Anpassungen auf der Ebene des SONAR-MAS das gleiche Ergebnis haben wie die *globale* Transformation auf Ebene der Organisation. Formal heißt dies, dass das Diagramm in Abbildung 12.8 kommutieren soll:

$$\mu(f(Org_1, Ag_1)) = g(\mu(Org_1, Ag_1))$$

In Kurzform: $\mu \circ f = g \circ \mu$. Betrachten wir nun, wie diese Lokalisierung zu erreichen ist.

12.4.1 Lokale Transformationen

Eine Transformation ist lokal, wenn sich die Transformation nur auf eine Organisationsposition O bezieht, d.h. wenn sich im Kontext $\bar{\mathcal{O}} := \mathcal{O}_1 \setminus \{O\}$ keine Veränderungen ergeben. Sie ist übergreifend, wenn die Änderung an einer Position auch welche an anderen Positionen nach sich zieht.

Definition 12.2 *Sei $O \in \mathcal{O}$ eine Position. Eine Transformation λ ist* O-lokal, *wenn folgendes für jedes Bild von λ gilt:*

$$\lambda : (N_1, \mathcal{O}_1, R_1, D_1, \psi_1, Ag_1) \mapsto (N_2, \mathcal{O}_2, R_2, D_2, \psi_2, Ag_2)$$

1. *Die Position des Kontextes bleiben erhalten:*

$$(\mathcal{O}_1 \setminus \{O\}) \subseteq \mathcal{O}_2$$

2. *Im Kontext beginnende Kanten bleiben erhalten:*

$$((x, y) \in F_1 \wedge x \in \bar{\mathcal{O}}) \Longrightarrow (x, y) \in F_2$$

3. *Die Anschriften bleiben im Kontext erhalten:*

$$\begin{aligned} R_1|_{(P_1 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}})} &= R_2|_{(P_2 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}})} \\ D_1|_{(T_1 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}})} &= D_2|_{(T_2 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}})} \\ \psi_1|_{(T_1 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}})} &= \psi_2|_{(T_2 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}})} \\ Ag_1|_{(\bigcup \bar{\mathcal{O}})} &= Ag_2|_{(\bigcup \bar{\mathcal{O}})} \end{aligned}$$

Eine Transformation heißt lokal, wenn sie O-lokal für ein O ist.

Eine Transformation f heißt lokalisierbar, *wenn sie sich als Komposition lokaler Transformation darstellen lässt.*

Bei einer O-lokale Transformationen verändert sich die Zusammensetzung von O, beispielsweise, indem Knoten gelöscht oder hinzugefügt werden. Trotzdem kann eine andere Menge O' den Platz von O gewissermaßen ersetzen. Man beachte aber, dass O-lokale Transformationen nicht implizieren, dass O stets in diesem Sinne erhalten bleibt, denn O kann sogar als ganzes gelöscht werden oder durch mehrere Positionen $O_1, \ldots, O_n$ ersetzt werden. Eine O-lokale Transformation schließt mit ein, dass der Positionsagent $Ag(O)$ gelöscht oder auf mehrere aufgeteilt wird.

Lemma 12.3 *Sei λ eine O-lokale Transformation.*

- *Die Knoten im Kontext bleiben erhalten:*

$$(P_1 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}}) \subseteq P_2 \quad \textit{und} \quad (T_1 \cap \bigcup \bar{\mathcal{O}}) \subseteq T_2$$

- *Knoten, die mit dem Kontext verbunden sind, bleiben erhalten:*

$$((x,y) \in F_1 \wedge x \notin \bar{\mathcal{O}} \wedge y \in \bar{\mathcal{O}}) \Longrightarrow y \in \bigcup \mathcal{O} \setminus \bigcup \bar{\mathcal{O}}$$

- *Die Kanten des Kontextes bleiben erhalten:*

$$(F_1 \cap \bar{\mathcal{O}}^2) \subseteq F_2$$

- *Das Organisationsnetz verändert sich nicht im Kontext:*

$$N_1|_{\bar{\mathcal{O}}} = N_2|_{\bar{\mathcal{O}}}$$

Beweis: (1) Da die Position des Kontextes $\bar{\mathcal{O}}$ erhalten bleiben und da für jedes $O' \in \bar{\mathcal{O}}$ auch $O' \subseteq P_1 \cup T_2$ gilt, müssen auch alle Knoten in O' erhalten bleiben, d.h. $\bigcup \bar{\mathcal{O}} \subseteq (P_2 \cup T_2)$ gilt. Da wir gefordert haben, dass alle Stellenmengen Teilmenge der universellen Menge $\mathcal{P}_u$ sind (und analog auch für Transitionen), folgen die Inklusion sogar jeweils für Stellen und Transitionen.

(2) Wenn eine Kante $(x,y) \in F_1$ in O endet, aber nicht dort beginnt, dann folgt aus der Definition, dass die Kante auch im Bild von λ sein muss. Also müssen auch x und y im Bild sein, denn das Bild eines Organisationsnetzes unter λ ist wiederum ein Netz.

(3) Die Aussage ist äquivalent zu $(x,y) \in (F_1 \cap \bar{\mathcal{O}}^2) \Longrightarrow (x,y) \in F_2$. Die Kanten des Kontextes starten insbesondere dort, bleiben also nach Definition erhalten.

(4) Direkt aus (1) und (3). q.e.d.

Lokale Transformation entsprechen der Nebenläufigkeit.

Theorem 12.4 *Wenn $O_1, O_2 \in \mathcal{O}$ zwei verschiedene Positionen sind, dann sind die O_i-lokale Transformationen λ_i für $i = 1, 2$ nebenläufig.*

Beweis: Wenn beide Transformation für verschiedene Positionen lokalisiert sind, dann werden auch unterschiedliche Netzknoten modifiziert, womit die Nebenläufigkeit folgt. q.e.d.

12.4.2 Transparente Transformationen

Wir betrachten nun die Operationalisierung, d.h. die Ausführung der lokalen Transformationen im Multiagentensystem, wie wir es einleitend im Diagramm 12.8 beschrieben haben.

Wie wir gesehen haben, impliziert eine O-lokale Transformationen, dass der Kontext von O unverändert bleibt. Nur O verändert sich. Man könnte daher

glauben, dass beim parallel stattfindenden Übergang auf der Ebene des Multiagentensystems:

$$\mu(N_1, \mathcal{O}_1, R_1, D_1, \psi_1, Ag_1) \mapsto \mu(N_2, \mathcal{O}_2, R_2, D_2, \psi_2, Ag_2)$$

ebenfalls alle Positionsagenten im Kontext erhalten bleiben. Dies ist aber leider nicht so: Nehmen wir an, dass O bislang lediglich aus den beiden Transitionen t_1 und t_2 bestand und dass eine Transformationen O in die zwei Positionen $O_1 = \{t_1\}$ und $O_2 = \{t_2\}$ aufgespalten wird (vgl. Abbildung 12.9). Diese Transformation ist O-lokal. Jede andere Position O', die eine Delegationskante von der Form (p, t_1) bzw. (p, t_2) besitzt, hat in den Handlungsmöglichkeiten $\Delta_{Ag(O')}$ einen Eintrag, in dem $Ag(O)$ als Delegationspartner eingetragen ist. Nach der Transformation stehen aber nur die beiden Positionsagenten $Ag(O_1)$ und $Ag(O_2)$ als Delegationspartner zur Verfügung. Die Modifikation muss sich also auch in $Ag(O')$ widerspiegeln. Die Transformation ist somit lokal auf der Ebene der Organisation, aber nicht auf Ebene der Positionsagenten.

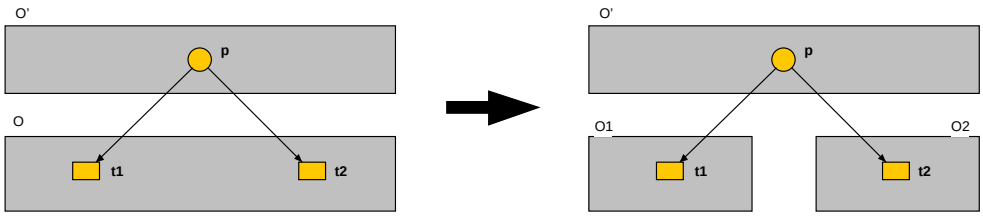


Abbildung 12.9: Lokale Transformation einer Position

Wir fragen uns nun, welche O-lokalen Transformationen nur durch eine Modifikation des Positionsagenten $Ag(O)$ allein durchgeführt werden können.

Hierbei sind alle externen Referenzen auf O zu erhalten. Sei

$$\lambda : (N_1, \mathcal{O}_1, R_1, D_1, \psi_1, Ag_1) \mapsto (N_2, \mathcal{O}_2, R_2, D_2, \psi_2, Ag_2)$$

eine O-lokale Transformation mit $O \in \mathcal{O}_1$ und sei $|\mathcal{O}_1| = |\mathcal{O}_2|$. Da die Positionen des Kontextes erhalten bleiben, d.h. $(\mathcal{O}_1 \setminus \{O\}) \subseteq \mathcal{O}_2$ gilt folgt aus $|\mathcal{O}_1| = |\mathcal{O}_2|$, dass es ein O_2 gibt, so dass

$$(\mathcal{O}_1 \setminus \{O\}) \uplus \{O_2\} = \mathcal{O}_2 \quad \text{bzw.} \quad \mathcal{O}_2 \setminus (\mathcal{O}_1 \setminus \{O\}) = \{O_2\}$$

Gilt für diese Positionen

$$Ag(O) = Ag(O_2),$$

dann geschieht die Ersetzung von O durch O_2 transparent für Positionsagenten im Kontext.

Definition 12.5 *Eine O-lokale Transformation λ mit $O \in \mathcal{O}_1$ heißt O-*transparent*, falls gilt:*

1. $|\mathcal{O}_1| = |\mathcal{O}_2|$
2. $Ag(O) = Ag(O_2)$ *für* $\{O_2\} = \mathcal{O}_2 \setminus (\mathcal{O}_1 \setminus \{O\})$.

Um die Transformation auch tatsächlich operationalisieren zu können, wollen wir natürlich, dass der Teamagent, der die O-transparente Transformation λ vornimmt, identisch mit dem Positionsagenten $Ag(O(t))$ ist.

Folgendes Theorem zeigt, dass jede O-transparente Transformation vom Positionsagenten $Ag(O)$ allein durchgeführt werden kann.

Theorem 12.6 *Wenn λ eine O-transparente Transformation $(Org_1, Ag_1) \mapsto (Org_2, Ag_2)$ ist, dann bleiben in den Bildern in $\mu(Org_1, Ag_1)$ und $\mu(Org_2, Ag_2)$ die Agentennamen des Multiagentensystems unverändert. Die Interna des Positionsagenten $Ag(O)$ verändern sich, die Interna aller anderen bleiben unverändert.*

Beweis: Man beachte, dass $Ag_i, i = 1, 2$ nach Definition eine Injektion ist. Jede Position O ist eindeutig dem Positionsagenten $Ag_1(O)$ zugeordnet. Wir betrachten dazu die Konstruktion der Agenten $Ag(O)$ von den $\mu(Org_i, Ag_i)$ nach Definition 11.23. Da λ transparent ist, gilt $Ag_1(O) = Ag_2(O)$. Sei nun $A_O := Ag_1(O)$.

1. Die Rollenfähigkeiten

   $$\rho_{A_O}(D_0) = \{R({}^\bullet t) \mid t \in Ag^{-1}(A_O) \cap T, D(t) = D_0, t^\bullet = \emptyset\}$$

   sind lokal definiert, da alle $t \in Ag^{-1}(A_O)$ und alle Stellen $p \in t^\bullet$ zu einer Position O gehören. Daher bezieht sich die Definition ρ_{A_O} nur auf eine Position.

2. Die Teamgeneration $\gamma_{A_O}(R) = G(K_{\tau_{A_O}}(N, R))$ ist O-lokal, da $\tau^3_{A_O}$ dies ist.

3. Die Handlungsmöglichkeiten

   $$\Delta_{A_O}(G)(b) = \{ \quad (D(t), \{(R(p), A_p) \mid p \in t^\bullet\}) \quad \mid \\ t \in (T \cap \phi(b)^\bullet \cap Ag^{-1}(A_O)), \forall p \in t^\bullet : A_p \in \mathcal{A}_{dlg}(p) \}$$

   sind nicht lokal, da sich die Definition nicht nur auf die Knoten t und $t^\bullet$ einer Position O – also die lokalen Elemente – , sondern auch auf die Agenten $\mathcal{A}_{dlg}(p) = \{Ag(O(t)) \mid t \in p^\bullet\}$ nach (11.12), also auch auf andere Positionen, bezieht. Da λ sogar O-transparent ist und somit $Ag(O) = Ag(O_2)$ gilt, verändert sich jedoch $\mathcal{A}_{dlg}(p)$ nicht, und die Modifikation hat doch nur lokale Auswirkung.

4. Die Handlungsmöglichkeiten $\delta_{A_O}(G)(\Delta)(b)$ ergeben sich anhand des Teams G – sind also unabhängig von den Positionen.

5. Die Definition des Handlungsplans $\pi_{A_O}(G)(D)(p) \in Proc(D(G), \hat{\psi}(G))$ ist ebenfalls unabhängig von den Positionen.

Also sind alle Modifikation unabhängig von der Positionsstruktur oder die Auswirkungen lokal begrenzt. Da eine O-lokale Transformation nur Änderungen innerhalb von O vornimmt, ändert sich daher nur A_O und alle anderen Positionsagenten bleiben unverändert, q.e.d.

Wenn die Transformation λ nur O-lokal, aber nicht transparent ist, dann kann bei der Transformationen die Position O in n Positionen $O_1, \ldots, O_n$ aufgespalten werden. Ein Beispiel für $n = 2$ zeigt Abbildung 12.9. Die Transformation kann von $Ag(O)$ realisiert werden, indem der Agent $Ag(O)$ zunächst n neue Agenten $A_1, \ldots, A_n$ mit $Ag(O_i) := A_i$ für alle i erzeugt, diese mit den von λ beschriebenen Interna ausstattet und sich anschließend selbst löscht. Hierbei ist auch $n = 0$ möglich, was bedeutet, dass der Agent sich selbst löscht.

Wie wir im Beweis von Theorem 12.6 gesehen haben, sind von der Transformation alle Positionsagenten A betroffen, die potentiell an $Ag(O)$ delegieren, sobald die Transformation λ nur O-lokal, aber nicht transparent sind, denn dann ist in Δ_A ein Verweis auf $Ag(O)$ gespeichert. Damit die Transformation von den Agenten realisiert werden kann, müssen wir also alle Agenten informieren, die an O delegieren. Dies können wir direkt am Organisationsnetz ablesen, denn eine Delegation von O_1 an O_2 entspricht genau einer Kante (p, t) mit $O_1 = O(p)$ und $O_2 = O(t)$. Die Menge der Positionen, die an O delegieren, ist nach (11.13) die Menge $\mathcal{O}_{gen}(t)$.

Wir können sicher sein, dass die delegierenden Positionen ihre internen Datenstrukturen (d.h. $\Delta_{Ag(O)}$) an die Veränderung anpassen, wenn wir alle Positionen der Menge $\mathcal{O}_{gen}(t)$ benachrichtigen. Um dies sicherzustellen, fordern wir, dass jede Positionen $O \in \mathcal{O}_{gen}(t)$ auch in den maximalen Positionen des Teams G, d.h. in $O(G^\circ)$, enthalten ist.

Theorem 12.7 *Sei G ein Team mit $\bigcup_{t \in G^\circ} \mathcal{O}_{gen}(t) \subseteq O(G^\circ)$ (Delegationsabschluß), dann kann die Teamtransformation $\lambda(\pi_G)$ verteilt durch lokale Meta-Planung implementiert werden.*

Beweis: Verglichen mit dem Beweis von Theorem 12.6 ist hier nur noch zu zeigen, dass an $Ag(O)$ delegierende Positionsagenten, d.h. alle $O \in \mathcal{O}_{gen}(t)$, an der Transformation teilnehmen, d.h. Teammitglieder sind, damit sie in ihren Präferenzordnungen Δ_A den Verweis auf $Ag(O)$ anpassen können. Genau dies ist aber durch den Delegationsabschluß bereits sichergestellt. Unter dieser Annahme ist auch für O-lokale Transformation sichergestellt, dass die Transformation, die durch das Team beschrieben wird, auch wirklich verteilt implementiert werden kann. q.e.d.

12.4.3 Transformationsteams und -dienste

Manche Transformationen lassen sich nicht mit einer lokalen Transformation erledigen. Aus der Definition einer lokalen Transformation folgt, dass keine Kante (p, t) entfernt werden kann, wenn sie außerhalb, d.h. im Kontext von O startet, d.h. wenn $p \in \bigcup \bar{\mathcal{O}}$ gilt. Inhaltlich bedeutet dies, dass keine Positionsagent eine Delegationskante löschen darf. Erst recht darf eine Position keine Transition t löschen. Will eine Position die Transition t löschen, muss sie die Position, in der die Delegationskante (p, t) startet, überzeugen, diese Kante zu löschen. Wenn diese dann nicht mehr existiert, dann ist O frei, die Transition t selbst zu entfernen, da t nicht vernetzt ist. Abbildung 12.10 illustriert das Verfahren. Dieses koordinierte Handeln zur Transformation bringt uns im folgenden zum Konzept der Transformationsteams.

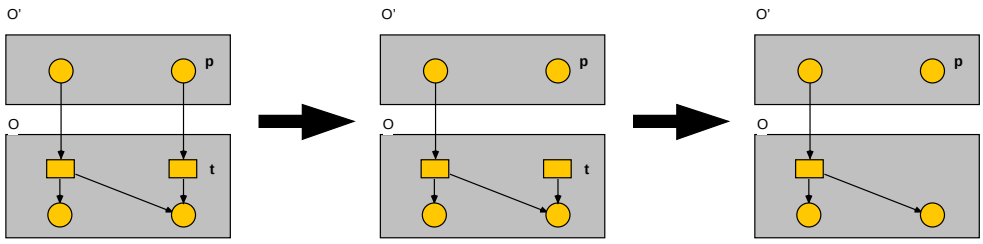


Abbildung 12.10: Koordinierte Transformation

Wir definieren Transformationsteams, um eine agentenbasierte Komposition von Transformationen beschreiben zu können. Jeder Transition t eines Dienstnetzes wird dazu eine Transformation $\lambda(t)$ zugeordnet. Dies soll bedeuten, dass wann immer die Transition t schaltet, das Team die Transformation $\lambda(t)$ vornimmt.

Definition 12.8 *Ein* Transformationsdienst (D, λ) *besteht aus einem Dienstnetz D und einer Transformationsanschrift $\lambda : T \to \mathcal{TM}$, die jeder Transition von D eine Transformation $\lambda(t)$ zuordnet.*

Eine Organisation, deren Dienste Transformationsinschriften tragen, bezeichnen wir als transformierend.

Jedes Dienstnetz kann als eine Transformationsdienst betrachtet werden, wenn wir jeder Transition die Identitätstranformation, die keinerlei Modifikationen vornimmt, zuweisen: $\lambda(t) = id$. Offensichtlich verändert sich dadurch nichts an den bislang beschriebenen Eigenschaften. Wir können daher annehmen, dass alle Dienste der Menge $\mathcal{D}$ Transformationsinschriften tragen.

Da wir nur an der Transformation des Teams, nicht aber an den Einzeltransformation interessiert sind, ist es nicht notwendig, dass schon die Transformationen $\lambda(t)$ wohlgeformt sind. Es ist jedoch wünschenswert, dass das gemeinschaftliche Werk eines Teams: $\lambda(\pi_G)$ insgesamt eine wohlgeformte Transformation beschreibt.

Ganz analog zu bisherigen Teamwork erzeugen wir zunächst ein Team G und dadurch einen Teamdienst $D(G)$ und – im weiteren Verlauf – einen Teamplan π_G. Jedem Ereignis e in π_G ist durch die Abbildung λ die Transformation $\lambda(\phi(e))$ zugeordnet.

Weiterhin definieren wir die Transformation $\lambda(\pi_G)$, die vom Teamplan π_G beschrieben wird. Die Transformation $\lambda(\pi_G)$ soll funktional sein, d.h. sie soll unabhängig von der Ausführungsreihenfolge nebenläufiger Ereignisse sein (vgl. dazu das Konzept der Funktionalität schematischer Auftragssysteme in Jessen und Valk, 1987, S.166 ff.). Dazu benötigen wir zunächst eine Definition, welche Transformation eine sequentielle Schaltfolge erzeugt.

Jede Schaltfolge $w = t_1 \cdots t_n$ eines Transformationsdienstes erzeugt die Transformation $\lambda(w) : \mathcal{ORG} \to \mathcal{ORG}$, die durch Funktionskomposition entsteht:

$$\lambda(w) = \lambda(t_1 \cdots t_n) := \lambda(t_1); \cdots ; \lambda(t_n) = \lambda(t_n) \circ \cdots \circ \lambda(t_1) \tag{12.1}$$

Eine Schaltfolge w eines Teamplanes π_G erzeugt dann mittels der Prozessabbildung ϕ die Transformation:

$$\lambda(\phi(w)) = \lambda(\phi(e_1 \cdots t_n)) := \lambda(\phi(e_1)) \cdots t_n)) \tag{12.2}$$

Die Transformation $\lambda(\phi(w))$ soll unabhängig von der Wahl der konkreten Schaltfolge sein. Dies ist nur möglich, wenn nebenläufige Ereignisse in π_G auch nebenläufige Transformation beschreiben. Außerdem soll sie eine wohlgeformte Transformation darstellen, d.h. eine wohlgeformte Organisation auf eine solche abbilden.

Wir interessieren uns im folgenden für solche Teams und Dienste, bei denen alle $\lambda(\phi(e))$ lokal zu der Position O sind, die e ausführt. Dazu betrachten wir die Rollenkomponente von $D(G)$, die von einer Position $O \in O(G^\circ)$ ausgeführt wird. Diese ergibt sich analog zur Definition (10.9) als:

$$D(G, O) := \Big\|_{t \in K^\circ \cap O} D(t)[R(p(t))] \tag{12.3}$$

Jedes Ereignis e des Teamplans π_G wird dann genau von genau einer Position $O \in O(G^\circ)$ ausgeführt, nämlich von der, die $\phi(e)$ als Transition in ihrer Rollenkomponente $D(G, O)$ besitzt. Diese Position bezeichnen wir mit $O(\pi_G, e)$. Für alle Ereignisse in π_G soll die Transformation $\lambda(\phi(e))$ eine $O(\pi_G, e)$-transparente Transformation sein.

Weiterhin sollen für jede Position O alle Schaltfolge ${}^\circ\pi_G \xrightarrow{w} \pi_G{}^\circ$ in der Einschränkung auf die Ereignisse e, die O zugeordnet sind, auch funktional sein. Dazu definieren wir die Projektionshomomorphismus $h_O : E^*_{\pi_G} \to E^*_{\pi_G}$ durch:

$$h_O(e) = \begin{cases} e, & \text{falls } O(\pi_G, e) = O \\ \epsilon, & \text{sonst} \end{cases}$$

Funktionalität des Teamplans bezüglich der Transformation liegt vor, falls für jede Position $O \in O(G^\circ)$ und jede für jede Schaltfolgen ${}^\circ\pi_G \xrightarrow{w} \pi_G{}^\circ$ die auf O bezogene Transformation $\lambda(\phi(h_O(w)))$ wohldefiniert und unabhängig von w ist.

Wir fassen alle Anforderungen an den Teamplan π_G in der folgenden Definition zusammen.

Definition 12.9 *Ein Teamplan π_G eines Teams G ist* wohltransformierend, *wenn folgendes gilt:*

1. *Alle an eine transformierende Position potenziell delegierenden Position sind bereits Mitglieder des Teams:*

$$\bigcup_{t \in G^\circ} \mathcal{O}_{gen}(t) \subseteq O(G^\circ)$$

2. *Für alle Ereignisse e in π_G ist die Transformation $\lambda(\phi(e))$ eine $O(\pi_G, e)$-transparente Transformation.*

3. *Die Transformation $\lambda(\phi(w))$ ist unabhängig von der Wahl der Schaltfolge w in ${}^\circ\pi_G \xrightarrow{w} \pi_G{}^\circ$ und stellt eine wohlgeformte Transformation dar.*

4. *Für jede Position $O \in O(G^\circ)$ ist die auf O bezogene Transformation $\lambda(\phi(h_O(w)))$ unabhängig von der Schaltfolge ${}^\circ\pi_G \xrightarrow{w} \pi_G{}^\circ$.*

5. *Die Transformation setzt sich aus den auf die Positionen bezogenen Teiltransformationen zusammen:*

$$\lambda(\phi(w)) = \bigoplus_{O \in O(G^\circ)} \lambda(\phi(h_O(w)))$$

Ist der Teamplan π_G wohltransformierend, dann bezeichnen wir mit $\lambda(G) := \lambda(\pi_G) := \lambda(\phi(w))$ die Teamtransformation. *Analog bezeichnen wir mit $\lambda(\pi_G)|_O$ den Anteil der Team-Transformation, der O betrifft:*

$$\lambda(\pi_G)|_O := \lambda(\phi(h_O(w))) \text{ für irgendeine Schaltfolge } {}^\circ\pi_G \xrightarrow{w} \pi_G{}^\circ$$

Ein Team G ist wohltransformierend, wenn all seine Teampläne dies sind. Ein wohltransformierendes Team G heißt Transformationsteam.

Eine Organisation ist wohltransformierend, wenn alle seine Teams G es sind.

Nach dieser Definition sind alle „normalen“ Teampläne π_G wohldefiniert, denn für diese gilt ja gerade $\lambda(t) = id$.

In Analogie zu der Menge aller wohlgeformten Teampläne nach (10.18) definieren wir die Menge aller Transformationspläne einer Gruppe G:

$$\textit{Transformationspläne}(G) := \{\pi_G \in \textit{Proc}(D(G)) \mid \pi_G \text{ ist wohltransformierend } \} \tag{12.4}$$

Die Eigenschaft eines Teamplans π_G, wohltransformierend zu sein, lässt sich – in bezug auf die Funktionalität – beispielsweise dadurch erreichen, dass der Teamplan sequentiell ist, d.h. keine nebenläufigen Ereignisse besitzt, oder dadurch, dass alle Transformation $\lambda(t)$ bereits nebenläufig sind. In allen Zwischenfällen sind die kausalen Abhängigkeiten innerhalb eines Dienstnetzes so zu spezifizieren, dass nicht-nebenläufige Transformationen nie durch nebenläufige Ereignisse im Teamplan beschrieben werden.

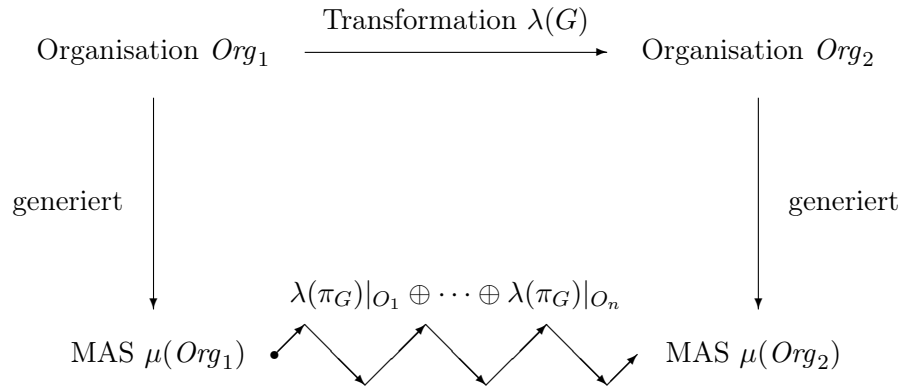


Abbildung 12.11: Transformation als Metaplanung π_G im Team G

Abbildung 12.11 illustriert den Fakt, dass sich jeder Teamplan π_G aus den auf die Positionen O bezogenen Teiltransformationen $\lambda(\pi_G)|_O$ zusammensetzt.

Die Transformation $\lambda(G)$ ergibt sich dann also als Kompositionen der lokalen Transformationen der Positionen des Teams G.

12.4.4 Lokale Transformation als Meta-Planung

Betrachten wir wohltransformierende Pläne π_G, folgt aus der Definition 12.9 die Dekompositionseigenschaft der Transformation:

$$\lambda(\pi_G) = \bigoplus_{O \in O(G^\circ)} \lambda(\pi_G)|_O$$

Die Gesamttransformartion setzt sich also aus den lokalen Transformationen der Positionsagenten zusammen. Jede O-transparente Transformation eines Transformationsteams kann nach Theorem 12.6 vom Positionsagenten $Ag(O)$ allein, d.h. ohne Mithilfe anderer, durchgeführt werden. Diese lokalen Modifikation sind bereits im Modell des SONAR-Agenten enthalten. Sie werden in Form von *Meta-Planer* umgesetzt. Sie haben die Aufgabe, Planungsstrategien anzupassen oder Handlungsroutinen zu erlernen usw. Im Modell aus Abbildung 10.9 sind dies die beiden Transitionen Interdependenzen bewältigen und inkorporieren. Wie wir bereits gesehen haben, erfolgt im SONAR-Modell die Meta-Planung der Interdependenzbewältigung durch eine Anpassung der Selektionsfunktion δ und π. Die Transition inkorporieren modifiziert mit Hilfe des Meta-Planers β^1 die restlichen Interna des Agenten:

$$\beta^1(\rho, \gamma, \Delta) = (\rho', \gamma', \Delta')$$

Im Beweis von Theorem 12.6 ist implizit schon enthalten, wie diese Modifikationen vorzunehmen sind. Die Inkorporation bezieht sich auf die Rollenfähigkeiten $\rho_{Ag(O)}(D)$, die Teamgeneration $\gamma_{Ag(O)}(R)$ und die Handlungsmöglichkeiten $\Delta_{Ag(O)}(G)$, denn diese Agenteninterna korelieren direkt mit der Organisationsstruktur, während die restlichen Komponenten nur Auswahlen unter von diesen Komponenten bereitgestellten Optionen treffen.

Bezeichne $A_O = Ag_1(O) = Ag_2(O)$ den sich transparent transformierenden Positionsagenten.

Der Teamselektor $\tau^3_A(R) \in \mathit{Start}_{Org}(R)$ ändert sich unter Umständen, da sich Menge der Profile $\mathit{Start}_{Org}(R)$, die die Rolle R anstoßen können, ändert, wenn sich P_1 zu P_2 ändert, denn nach (10.3) ist $\mathit{Start}_{i,RD}(R) = \{p \in P_i \mid R(p) = R, {}^\bullet p = \emptyset\}$ von $P_i, i = 1, 2$ abhängig. Bei der Teamtransformation ändert sich die Teamformation, da diese indirekt durch $\tau^3_{A_O}(R)$ definiert ist: $\gamma_{A_O}(R) = G(K_{\tau_{A_O}}(N, \tau^3_{A_O}(R)))$. Analoges gilt für Δ_{A_O} und ρ_{A_O}.

Alle Meta-Planungen β^1, die zu einer Transformation

$$\lambda : (N_1, \mathcal{O}_1, R_1, D_1, \psi_1, Ag_1) \mapsto (N_2, \mathcal{O}_2, R_2, D_2, \psi_2, Ag_2)$$

passen sollen, müssen daher gewisse Randbedingungen einhalten:

$$\rho_{A_O}(D_0) \mapsto \{R_2({}^\bullet t) \mid t \in Ag_2^{-1}(A_O) \cap T_2, D_2(t) = D_0, t^\bullet = \emptyset\}$$

$$\tau^3_{A_O}(R) \mapsto \beta^1(\tau^3) \text{ mit } \beta^1(\tau^3)(R) \in \mathit{Start}_{2,RD}(R)$$

$$\Delta_{A_O}(G)(b) \mapsto \begin{array}{ll} \{ & (D_2(t), \{(R_2(p), A_p) \mid p \in t^\bullet\}) \\ \mid & t \in (T_2 \cap \phi(b)^\bullet \cap Ag_2^{-1}(A_O)), \forall p \in t^\bullet : A_p \in \mathcal{A}_{dlg}(p)\} \end{array}$$

Welches Bild wir hierbei für $\beta^1(\tau^3)(R)$ definieren, ist gleichgültig, solange es nur in $Start_{2,RD}(R)$ liegt. Die Menge aller Abbildung bezeichnen wir mit $\mathcal{B}^1(\lambda)$.

Bislang hatten wir beliebige Modifikation β^1 als Meta-Planung zugelassen. Mit den Transformationsteams einer Organisation haben wir nun ein Kriterium, um die Wohlgeformtheit einer Meta-Planung zu charakterisieren.

Definition 12.10 *Sei der Teamplan π_G wohltransformierend. Eine Meta-Planung β^1 eines Positionsagenten O ist* wohlgeformt*, wenn β^1 durch den Transformationsplan π_G induziert wurde:*

$$\beta^1 \in \mathcal{B}^1\left(\lambda(\pi_G)|_O\right)$$

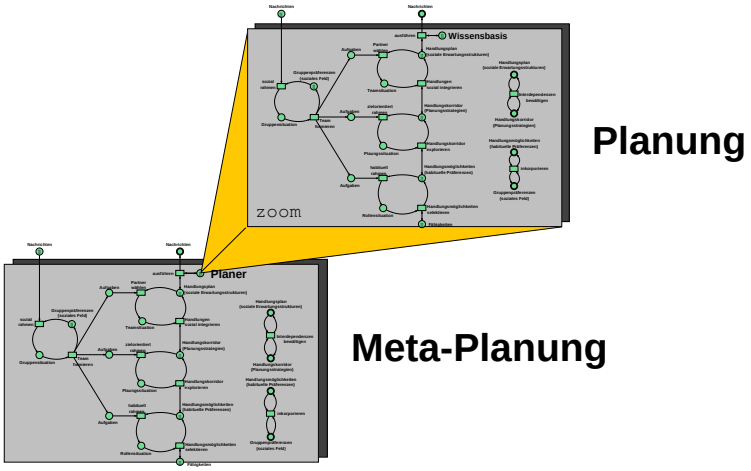


Abbildung 12.12: Die rekursive Planhierarchie im SONAR-Agenten

Wir wissen also, dass jeder Prozess einer wohlgeformten, transformierenden Organisation eine lokale Transformation darstellt und sich nach Theorem 12.6 alle Änderungen durch *lokale Modifikation an den Positionsagenten* vornehmen lassen. Wie wir zudem gesehen haben, vollzieht sich die Meta-Planung genauso wie die Planung. Die Planung, so wie sie Abbildung 10.9 beschreibt, und die Planungsparameter (Wissensbasis, Fähigkeiten, Gruppenpräferenzen, habituelle Präfernzen, Strategien und soziale Erwartungen) sind dabei Gegenstand der Meta-Planung. Genauso wie der Planer bei der Ausführung des Teamplans die Einträge in der Wissensbasis modifiziert, so modifiziert der Meta-Planer bei der Ausführung des Transformationsplans die Planungsparameter. Es ergibt sich somit eine rekursive Struktur der Planung: Die Daten des Meta-Planers (der ein Planer zweiter Stufe ist) sind die Planer der ersten Stufe. Die sich ergebende rekursive Planhierarchie innerhalb des SONAR-Agenten ist in Abbildung 12.12 dargestellt. Die rekursive Struktur kann analog auf höhere Rekursionsebenen ergänzt werden, d.h. auf die Meta-Meta-Ebene, die die Meta-Planung beeinflusst usw.

Mit Hilfe der Charakterisierung wohlgeformter Meta-Planung sind wir nun in der Lage, eine Transformation $\lambda(\pi_G)$, die sich anhand eines Transformationsdienstes ergibt, mit den Meta-Planungen der SONAR-Agenten in Beziehung zu setzen, so wie wir dies im Diagramm in Abbildung 12.8 gefordert haben.

Theorem 12.11 *Sei der Teamplan π_G wohltransformierend. Zu der Transformation $\lambda(\pi_G)(Org_1, Ag_1) \mapsto (Org_2, Ag_2)$ existiert eine verteilte Meta-Planung g im Transformationsteam, dessen Effekt der Transformation entspricht.*

Beweis: Formal ist die Kommutativität

$$\mu \circ f = g \circ \mu$$

des Diagramm in Abbildung 12.8 zu zeigen. Diese erhalten wir, wenn wir $f = \lambda(\pi_G)$ und $g = \bigoplus_{O \in O(G^\circ)} \beta^1(\lambda(\pi_G)|_O)$ setzen:

$$\mu\big((\lambda(\pi_G)(Org_1, Ag_1)\big) = \bigoplus_{O \in O(G^\circ)} \beta^1(\lambda(\pi_G)|_O)\,\big(\mu(Org_1, Ag_1)\big)$$

Also sind alle Transformationen der Organisation durch eine verteilte Meta-Planung der Teammitglieder implementierbar. q.e.d.

12.4.5 Geschichtete Organisationsmodelle

Wie durch die rekursive Struktur in Abbildung 12.12 illustriert, besitzen SONAR-Modelle eine rekursive Struktur. Um dies formal abzubilden, werden wir im folgenden ein *geschichtetes* Modell der Organisation einführen. Dazu definieren wir Organisationsmodelle, die die Eigenschaft haben, dass ihre Transformationsteams und -dienste der n-ten Ordnung nur Effekte auf den Teil der Organisationen haben, die von einer kleineren Ordnung sind.

Beginnen wir mit Petrinetzen der Ordnung n. Zu jedem $n \in \mathbb{N}$ existiert die abzählbar unendliche, universelle Stellenmenge der Ordnung n, mit $\mathcal{P}_n$ bezeichnet, und die abzählbar unendliche, universelle Transitionsmenge der Ordnung n, mit $\mathcal{T}_n$ bezeichnet. Ohne Einschränkung können wir annehmen, dass alle Mengen paarweise disjunkt sind. Die universelle Stellenmenge $\mathcal{P}_u$ und die universellen Transitionsmenge $\mathcal{T}_u$ ergeben sich als die disjunkte Vereinigung dieser Mengen: $\mathcal{P}_u := \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{P}_n$ und $\mathcal{T}_u := \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{T}_n$.

Ein Petrinetz $N = (P, T, F)$ ist von der Ordnung n, wenn Stellen und Transitionen dies sind, d.h. wenn $P \subseteq \mathcal{P}_n$ und $T \subseteq \mathcal{T}_n$ gilt.

Die Rollen sind ebenfalls typisiert. Zu jedem $n \in \mathbb{N}$ existiert die Rollenmenge Rol_n, aus der sich die Rollenstruktur der Ordnung n: $\mathcal{R}_n$ ableitet. Die allgemeine Rollenmenge Rol ergibt sich als die disjunkte Vereinigung aller dieser Mengen: $Rol := \bigcup_{n\in\mathbb{N}} Rol_n$ und $\mathcal{R} := \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{R}_n$.

Seien die Menge aller Transformationen $\mathcal{TM}_k$ der Ordnung $k < n$ bereits definiert (siehe unten). Das Paar (D, λ) ist ein *Transformationsdienst der Ordnung* n, wenn D ein Dienstnetz ist und $\lambda : T_D \to \left(\{id\} \cup \bigcup_{k=1}^{n-1} \mathcal{TM}_k\right)$ eine Transformationsanschrift, die jeder Transition t von D eine Transformation $\lambda(t)$ zuordnet, die von einer kleineren Ordnung sein muss, als die des Dienstes selbst. Die Menge aller Transformationsdienste der Ordnung $n > 0$ wird mit $\mathcal{D}_n$ bezeichnet. Die Abbildung 12.13) zeigt ein Beispiel eines solchen Transformationsdienstes.

Eine Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ nach Definition 11.1 fassen wir als Organisation über diesen Vereinigungsmengen auf, d.h. über der Stellenmenge $\mathcal{P}$,

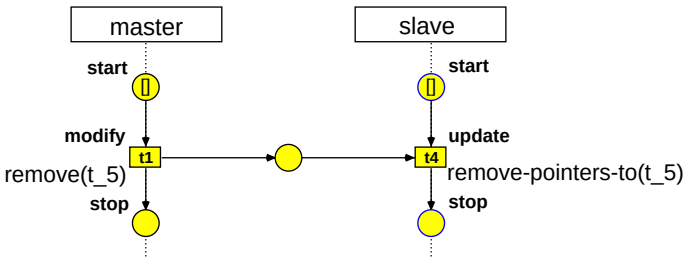


Abbildung 12.13: Transformationsdienst

der Transitionsmenge $\mathcal{T}$, der Rollenmenge $\mathcal{R}$ und der Dienstnetzmenge $\mathcal{D}$. Explizit bedeutet dies, dass eine Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ aus den folgenden Komponenten besteht:

1. $N = (P_N, T_N, F_N)$ ist ein Petrinetz mit $P_N \subseteq \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{P}_n$ und $T_N \subseteq \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{T}_n$.
2. $R : P_N \to \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{R}_n$ ist die Rollenzuweisung.
3. $D : T_N \to \bigcup_{n\in\mathbb{N}} \mathcal{D}_n$ ist die Dienstnetzuweisung.
4. $\psi : T_N \to PF_{\mathcal{D}}$ die ist die Prozessformelzuweisung.

Eine Organisation der Ordnung $n > 0$ ergibt sich als die folgende Einschränkung des Allgemeinfalls.

Definition 12.12 *Eine Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ ist von der Ordnung $n > 0$, wenn gilt:*

1. *$N = (P, T, F)$ ist ein Petrinetz der Ordnung n, d.h. es gilt $P \subseteq \mathcal{P}_n$ und $T \subseteq \mathcal{T}_n$.*
2. *R ist von der Ordnung n, d.h. es ist $R : P_N \to \mathcal{R}_n$.*
3. *D ist von der Ordnung n, d.h. es ist $D : T_N \to \mathcal{D}_n$.*

Analog ist eine MAS-Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi, Ag)$ von der Ordnung n, wenn die Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ dies ist. Die Menge aller MAS-Organisationen der Ordnung n wird mit $\mathcal{ORG}_n$ bezeichnet. Mit $\mathcal{ORG}$ bezeichnen wir die Menge aller Organisationen.

Eine Transformation der Ordnung $n > 0$ ist dann eine Abbildung von der Menge $\mathcal{ORG}_n$ auf sich selbst:

$$f_n : \mathcal{ORG}_n \to \mathcal{ORG}_n$$

Mit $\mathcal{TM}_n$ bezeichnen wir die Menge aller Transformationen der Ordnung n.

Man beachte, dass wir eine zyklische Beziehung zwischen den Konzepten benutzen: Transformationen wirken auf Organisationen und Organisationen wiederum bestehen u.a. aus Diensten, die ihrerseits Transformationsanschriften benötigen. Dieser definitorische Zyklus wird aufgebrochen, indem Transformationen der Ordnung n auf Organisationen der Ordnung n wirken und diese nur

Dienste enthalten können, deren Transformationen von einer kleineren Ordnung sind.

Definition 12.13 *Für jede Organisation* $Org = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ *mit* $N = (P, T, F)$ *definiere für jedes* $n \in \mathbb{N}$ *die Einschränkung:*

$$Org_n := (N_n, \mathcal{O}_n, R|P_n, D|T_n, \psi|T_n)$$

mit

1. $N_n := (P_n, T_n, F_n)$ *mit* $P_n := P \cap \mathcal{P}_n$, $T_n := T \cap \mathcal{T}_n$ *und* $F_n := F \cap (P_n \cup T_n)^2$.
2. $\mathcal{O}_n := \{O \cap (\mathcal{P}_n \cup \mathcal{T}_n) \mid O \in \mathcal{O}\}$

Eine geschichtete Organisation *ist eine Organisation* $Org^* = (N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$, *bei der die Einschränkung* Org_n *für jedes* $n \in \mathbb{N}$ *eine Organisation der Ordnung* n *ist und es keine gemischten Kanten gibt, d.h.* $F \subseteq \bigcup_{n\in\mathbb{N}} (\mathcal{P}_n \times \mathcal{T}_n) \cup (\mathcal{T}_n \times \mathcal{P}_n)$ *gilt.*

Analog ist eine MAS-Organisation $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi, Ag)$ *geschichtet, wenn die Organisation* $(N, \mathcal{O}, R, D, \psi)$ *dies ist. Die Menge aller geschichteten MAS-Organisationen wird mit* $\mathcal{ORG}^*$ *bezeichnet.*

Da wir nur endliche Organisationsmodelle betrachten wollen, sind fast alle Einschränkung Org_n leer. Wir können ein geschichtetes Organisationsmodell Org^* annähernd mit der Familie seiner Einschränkungen $(Org_n)_{n\in\mathbb{N}}$ identifizieren. Es ist jedoch zu beachten, dass die Positionen $O \in \mathcal{O}$ über die Einschränkungen hinweg definiert sein – eine Position verbindet also die Modelle über die Ordnungen hinweg.

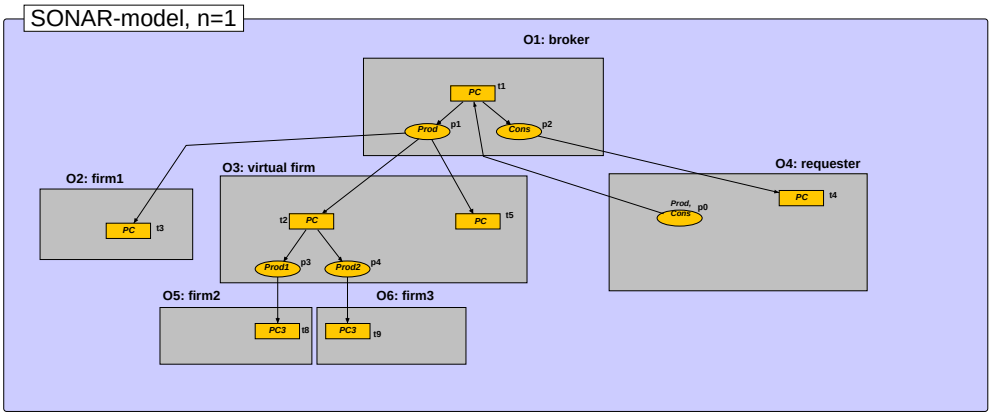


Abbildung 12.14: Organisationsmodell der Ordnung $n = 1$

Als Beispiel betrachten wir das Organisationsmodell Org^*, das sich aus den Organisationsmodellen $(Org_n)_n$ für $n = 1, 2$ zusammensetzt: Abbildung 12.14 zeigt das Organisationsmodell der Ordnung $n = 1$ und Abbildung 12.15 das der Ordnung $n = 2$. Die Positionen in beiden Modellen sind (notwendigerweise)

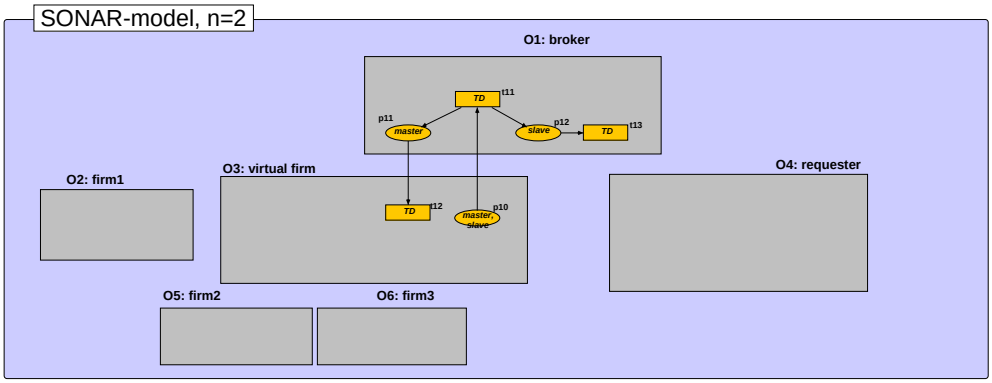


Abbildung 12.15: Organisationsmodell der Ordnung $n = 2$

identisch. Das Organisationsmodell regelt das gesamte Teamwork, d.h. auf der Ebene $n = 1$ die normalen Prozesse (hier: die durch die Dienstnetze PC aus Abbildung 9.1 und PC_3 aus Abbildung 9.10 spezifizierten Producer/Consumer-Beziehungen) und auf der Ebene $n = 2$ die Reorganisationsprozesse (hier: das Streichen der Transition t_5 in der Position *virtual firm* – spezifiziert durch den Transformationsdienst aus Abbildung 12.13). Der Transformationsdienst hat die beiden Rollen *master* und *slave*. Hierbei hat *master* die Aufgabe, die Transition t_5 zu löschen, während *slave* die Aufgabe hat, die Verweise auf t_5 zu löschen. Damit ist auch klar, dass die Rolle *master* von $O(t_5) = O_3$ implementiert werden muss, d.h. von der Position, in der t_5 vorkommt, und *slave* von der Position, die auf t_5 verweist, d.h. auf $O({}^\bullet t_5) = O_1$. Genauso ist auch die Delegationsstruktur im Modell aus Abbildung 12.15 spezifiziert.

Jede Transformation $f_n : \mathcal{ORG}_n \to \mathcal{ORG}_n$ erweitert sich zu einer Transformation $\hat{f} : \mathcal{ORG}^* \to \mathcal{ORG}^*$ auf der Gesamtheit aller geschichteten Organisationsmodelle, indem wir für weiteren Elemente die Identitätsfunktion verwenden:

$$\hat{f}(x) = \begin{cases} f_n(x), & \text{für } x \in \mathcal{ORG}_n \\ id, & \text{sonst} \end{cases}$$

Das Teamwork einer geschichteten Organisation ist ebenfalls geschichtet.

Lemma 12.14 *Sei ein geschichtetes Organisationsmodell Org^* gegeben. Die organisationalen Aktivitäten, d.h. das Teamwork, respektieren die Schichtung, d.h. durch den Prozess $(K, \phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N, p)$ generierte Team $G = G(K, \phi)$ besitzt nur Netzknoten, welche die gleiche Ordnung wie p besitzen.*

Beweis: Da nach Definition keine gemischten Kanten existieren, wird in jedem Prozessentfaltungsschritt eine Stelle der Ordnung n durch eine Transition und Stellen der gleichen Ordnung verlängert. Somit ist auch jedes von Org^* generierte G von genau einer Ordnung n, nämlich der Ordnung die der Platz p besitzt, mit der die Teamformation begonnen hat. q.e.d.

Jedes Team G, das von einer Organisation der Ordnung $n \in I$ generiert wurde, definiert eine Teamtransformation $\lambda(G) : \bigcup_{k=1}^{n-1} \mathcal{ORG}_k \to \bigcup_{k=1}^{n-1} \mathcal{ORG}_k$. Diese

wirkt also nur auf die Organisation der kleineren Ordnung, also auf das Modell $(Org_k)_{k<n}$. Die anderen Modelle der Familie $(Org_k)_{k\geq n}$ bleiben unverändert.

Vergleichen wir diese geschichtete Definition von Organisationen mit vorangegangenen, so ist klar, dass die Organisationen nach Definition 11.1 identisch sind mit den hier definierten Organisationen der Ordnung $n = 1$ und dass die transformierenden Reorganisationsprozesse nach Definition 12.8 identisch sind mit Organisationen der Ordnung $n = 2$.

12.4.6 Erzeugung der Ausführungsumgebung

Im folgenden wird gezeigt, dass wir aus einem Organisationsmodell Org^* eine Ausführungsumgebung für das Teamwork erzeugen können. Dies wollen wir an einem Beispiel exemplarisch vorführen. Wir betrachten dazu ein Organisationsmodell Org^*, das sich aus den Organisationsmodellen $(Org_n)_n$ für $n = 1, 2$ aus Abbildung 12.14 und Abbildung 12.15 zusammensetzt.

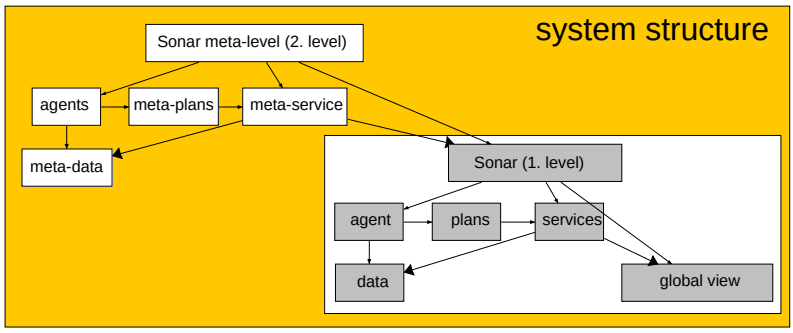


Abbildung 12.16: Systemarchitektur der Ausführungsumgebung für das Organisationsmodell aus Abb. 12.14 und 12.15

Aus den beiden Modellen in Abbildung 12.14 und 12.15 wurde die prototypische Ausführungsumgebung der Organisation, d.h. ihre Infrastruktur mechanisch erzeugt. Der Prototyp wurde so formuliert, dass er sich mit Hilfe des Petrinetzsimulators Renew direkt ausführen lässt. Der Aufbau des gesamten Systems ist in Abbildung 12.16 dargestellt. Die Ausführungsumgebung besitzt eine rekursive Struktur: Das Teilsystem der Ordnung $n = 1$ besteht aus einer Ausführungsumgebung für das Organisationsmodell der Ordnung $n = 1$. In ihm befinden sich alle Agenten des Systems – für jede Position einer – sowie die generierten Teamdienste. Teamdienste werden durch lokalisierte Teampläne gesteuert. Wird der Teamplan ausgeführt, so hat er – vermittelt über den Teamdienst – Effekte auf die lokalen Daten der Agenten und damit implizit auch auf die globale Datensicht. Auf der Meta-Ebene, also für $n = 2$, vollzieht sich dies ganz analog, nur dass die globale Datensicht jetzt ein Modell der Stufe $n = 1$ ist, das durch Meta-Dienste und -Pläne modifiziert werden kann.

Wir wollen den Prototypen nicht in allen Details diskutieren und geben stattdessen im folgenden nur eine Übersicht über die möglichen Prozesse.

Grundlage für das Teamwork bilden die Dienstnetze. Mit den entsprechenden Annotationen für die Kopplung an den Planer erhalten wir aus den Dienstnetzen

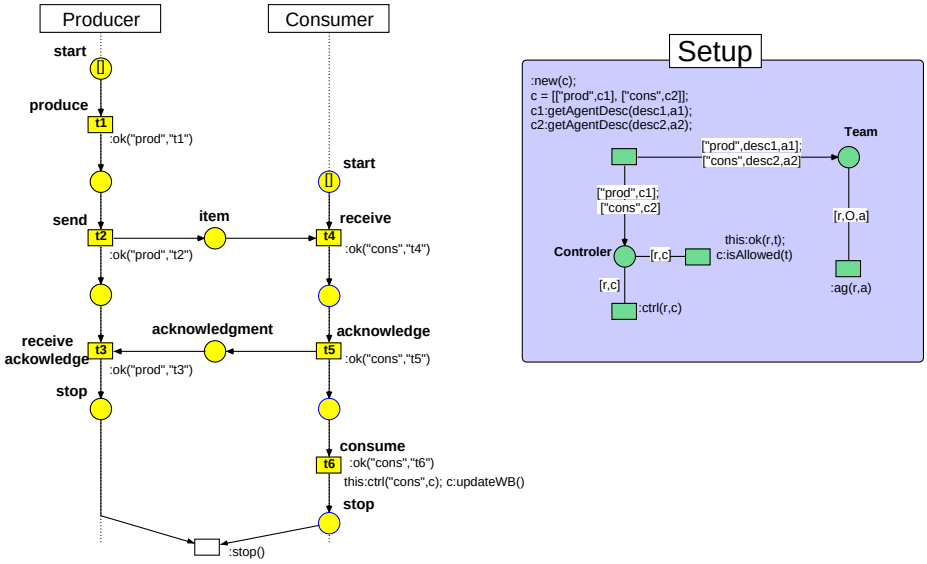


Abbildung 12.17: Prototyp: Das durch einen Planer gesteuerte Dienstnetz PC

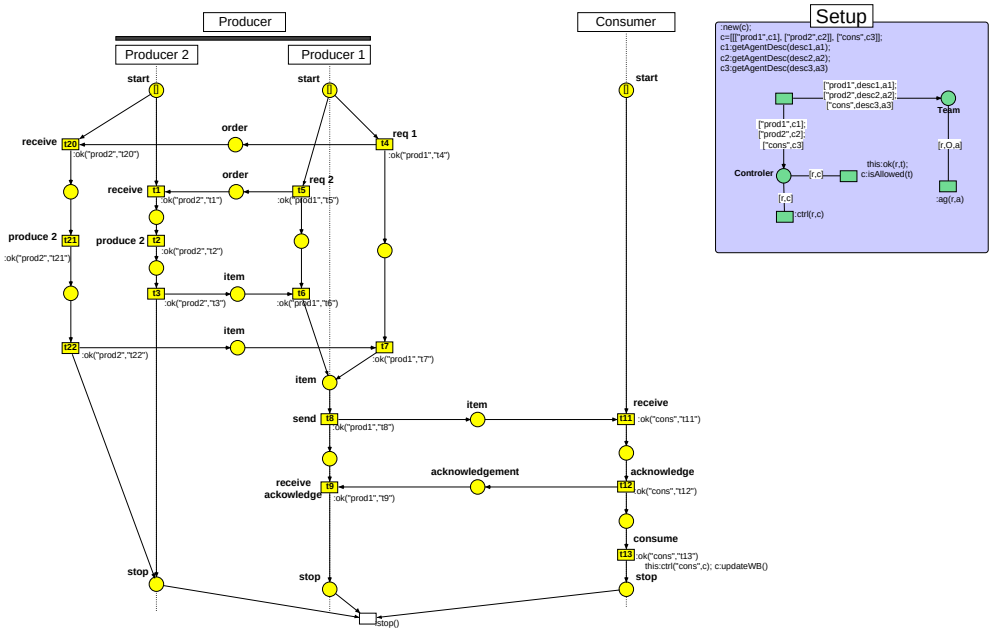


Abbildung 12.18: Prototyp: Das durch einen Planer gesteuerte Dienstnetz PC_3

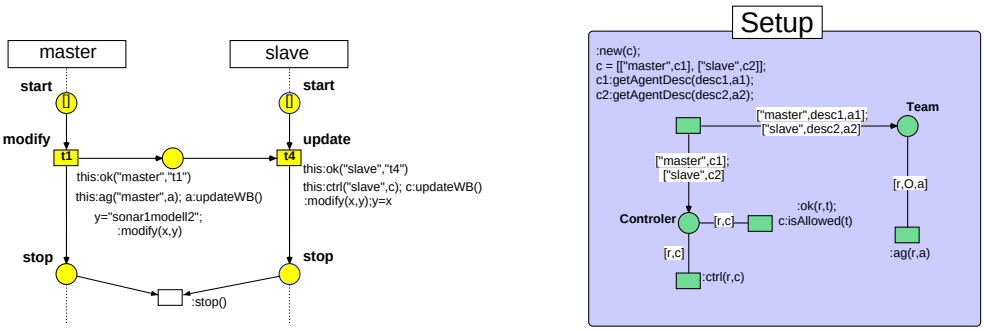


Abbildung 12.19: Prototyp: Der Transformationsdienst

PC und PC_3 direkt die Prototypen in Abb. 12.17 und Abb. 12.18. Die Kopplung geschieht durch die Kanalaufrufe der Form $:\mathsf{ok}(\mathsf{prod}, t_1)$ an der Aktion t_1 des Dienstes, die dann über den Kanal $c{:}\mathsf{isAllowed}(t_1)$ mit dem Plan c (engl. controler) synchronisiert werden. Der Transformationsdienst aus Abb. 12.13 erzeugt den Prototypen aus Abb. 12.19. Dienstnetze werden durch Pläne gesteuert. Zu jeder Rolle eines Dienstnetzes existiert ein eigener Plan, der von dem Agenten, der die Rolle implementiert, verwaltet wird. Der einer Rolle r zugeordnete Planer wählt unter allen aktivierten und der Rolle r zugeordneten Transitionen diejenige aus, die als nächstes schalten darf. Im allgemeinen verwaltet ein Agent mehrere Planer, da er an mehreren Interaktionen teilnimmt. Typischerweise bestehen dann Querverbindungen zwischen den Planern, beispielsweise um Verklemmungen oder race-conditions zu vermeiden.

Teams, Teamdienste und Planer entstehen als Ergebnis organisationaler Prozesse. Abbildung 12.20 zeigt die Ausführungsumgebung der Ordnung $n = 1$, so wie sie aus dem Modell aus Abb. 12.14 generiert wurde.[3] Analog zeigt Abbildung 12.22 die Ausführungsumgebung der Ordnung $n = 2$, so wie sie aus Abb. 12.15 generiert wurde.

Das System wird initialisiert, indem zunächst eine Instanz des Meta-Modell aus Abbildung 12.22 sowie sechs Agenten – für jede Position einer – generiert werden. Diese Agenten werden dann im SONAR-Meta-Modell registriert. Danach erzeugt das Meta-Modell eine Instanz des SONAR-Modells aus Abbildung 12.20 und registriert die Agenten auch dort. Danach ist die Initialisierung abgeschlossen.

Die beiden Netze aus Abbildung 12.20 und 12.22 unterscheiden sich zwar, sie sind aber dennoch strukturell identisch, denn sie unterscheiden sich nur insofern, als dass sie jeweils von einem anderen SONAR-Grundmodell generiert wurden. Die Erzeugungsregeln sind jedoch für beide identisch. Das Teamwork beider Ebenen untergliedert sich in sechs Phasen:

1. Organisationsexploration, bei der die Teamagenten ausgewählt werden.

[3] Die Anschriften des Modells sind in der Druckfassung natürlich nicht mehr lesbar. Was aber klar hervortritt, ist die Tatsache, dass die Grundstruktur der ursprünglichen Organisationsmodelle sich sechsfach wiederholt, entsprechend der hier implementierten sechs Phasen des Teamworks.

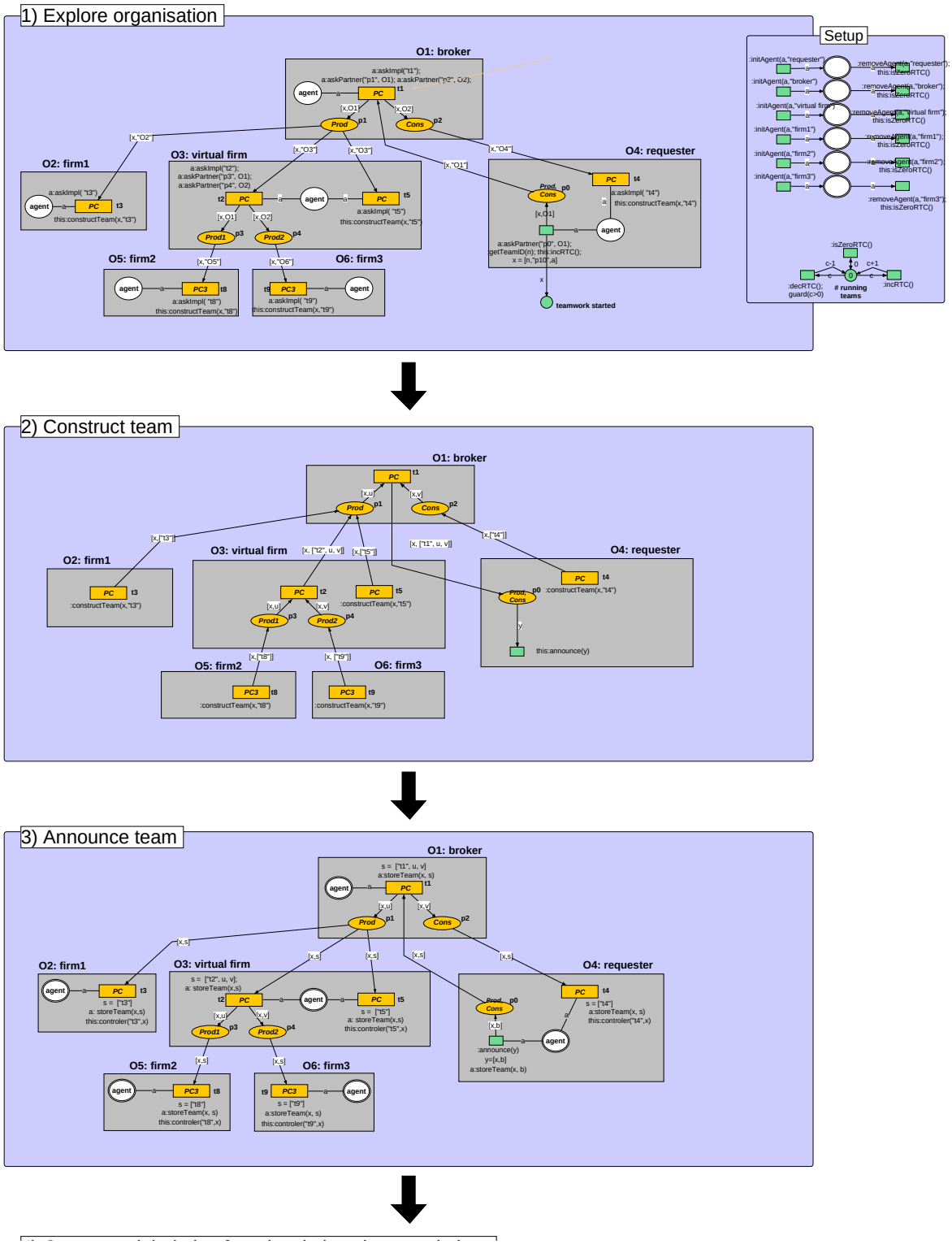


Abbildung 12.20: Die aus dem Organisationsmodell Org_1 generierte SONAR-Ausführungsumgebung (Fortsetzung in Abb. 12.21)

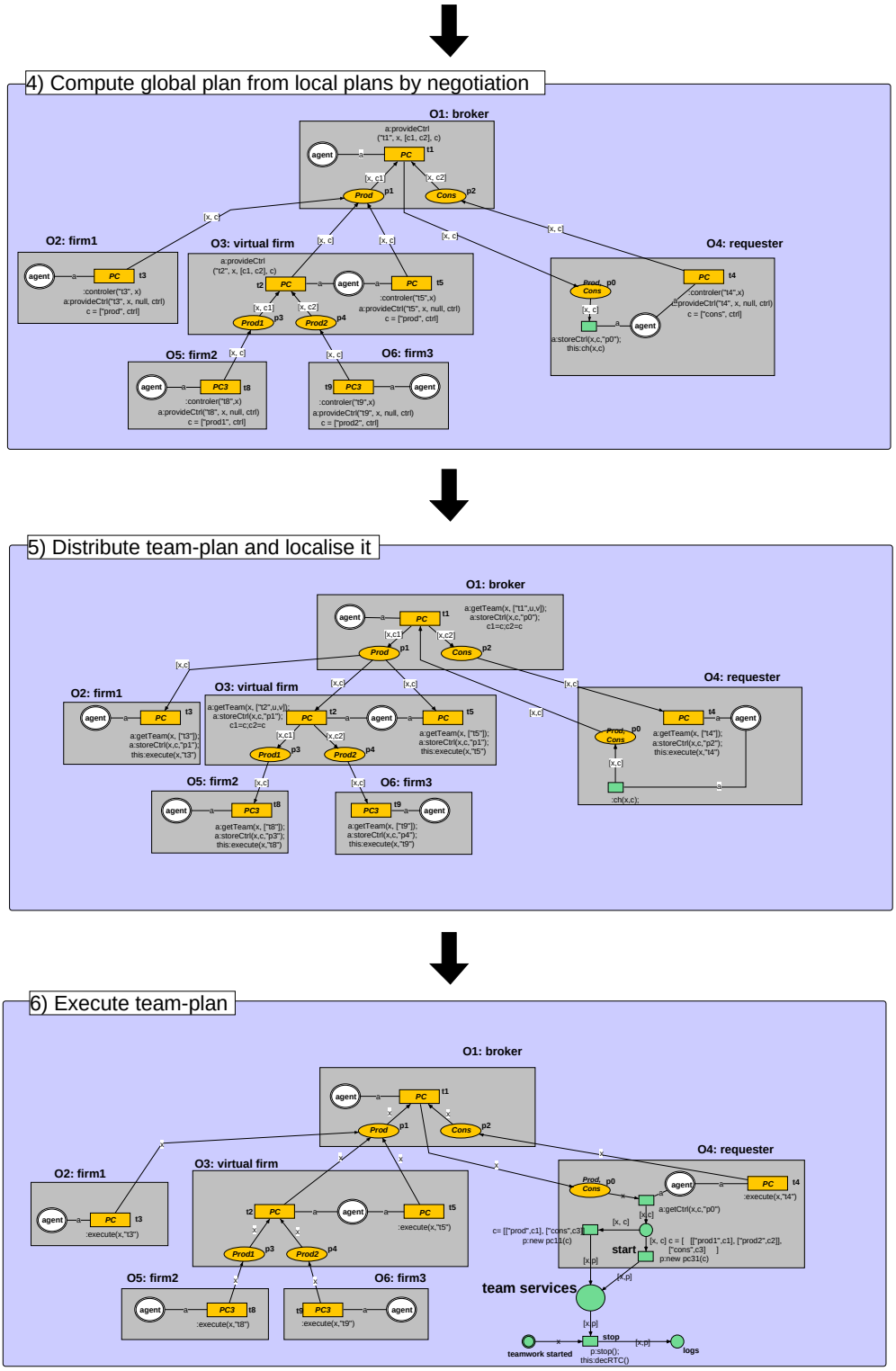


Abbildung 12.21: Die aus dem Organisationsmodell Org_1 generierte SONAR-Ausführungsumgebung (Fortsetzung von Abb. 12.20)

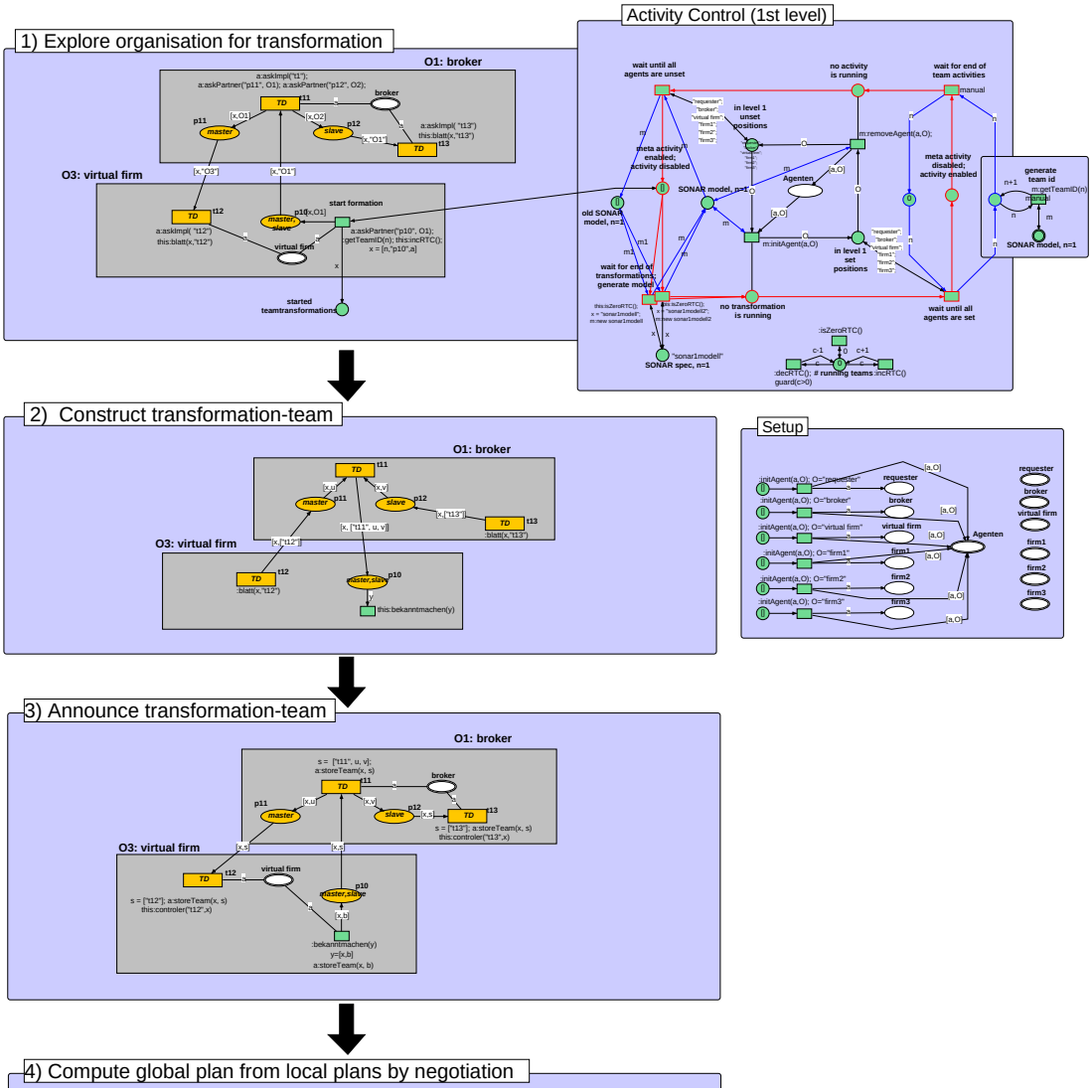


Abbildung 12.22: Die aus dem Organisationsmodell Org_2 generierte SONAR-Ausführungsumgebung (Fortsetzung in Abb. 12.23)

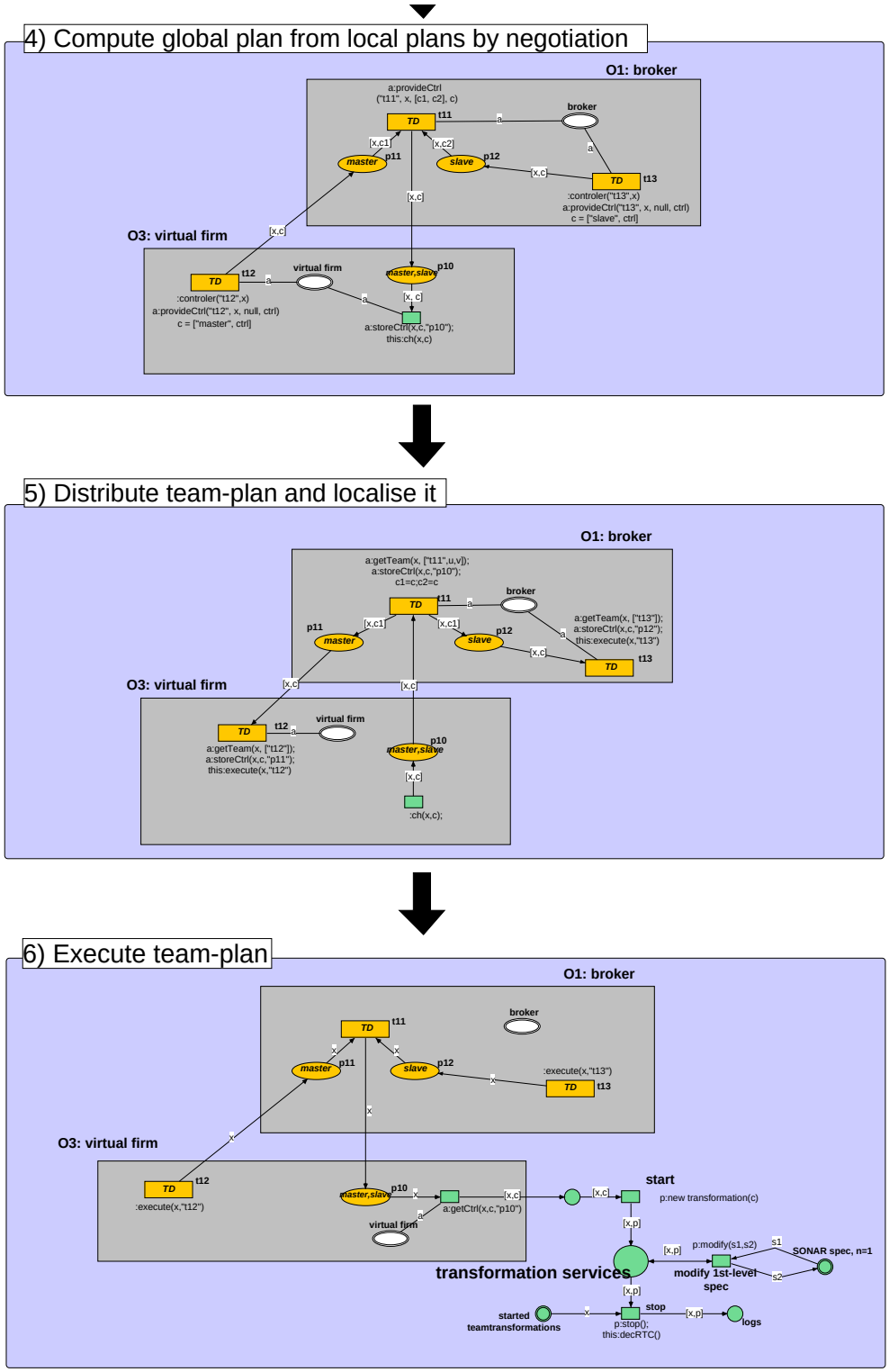


Abbildung 12.23: Die aus dem Organisationsmodell Org_2 generierte SONAR-Ausführungsumgebung (Fortsetzung von Abb. 12.22)

2. Teamnetzkonstruktion, bei der die Teilbäume rekursiv zusammengesetzt werden.
3. Bekanntmachung des Teamnetzes, von der Wurzel der Wurzel beginnend.
4. Erzeugung eines globalen Plans aus den lokalen Plänen durch Kompromisssuche.
5. Lokalisierung des globalen Plans durch die Teammitglieder.
6. Ausführung des Teamplanes, überwacht durch die Planer.

Für das gegebene SONAR-Modell der Ordnung $n = 1$ ist O_4 die einzige Position, die Teamwork initiieren kann. Die Organisationsexploration (Phase 1) muss bei der Stelle p_0 beginnen. Die Aufgabe kann nur an O_1 delegiert werden, der durch t_1 zwei Teilaufgaben p_1 und p_2 generiert. Der Agent der Position O_1 muss durch seinen Teamselektor τ auswählen, an wenn die Teilaufgaben delegiert werden. Für p_1 hat er die Wahl zwischen O_2 und O_3, für p_2 existiert nur O_4 als Partner. Im Modell wird diese Entscheidung durch die Synchronisation $\mathsf{a{:}askPartner}(p, O)$ getroffen, bei der der Agent a zur vorgegeben Stelle p für eine Bindung an die Positionsvariable O sorgt. Angenommen der Agent der Position O_1 entscheidet sich für die Position O_3, dann hat jener Agent wiederum eine Auswahl, wie er die Aufgabe implementiert: entweder durch t_2 oder durch t_5. Im Modell wird diese Entscheidung durch die Synchronisation mit dem Kanal $\mathsf{a{:}askImpl}(t)$ getroffen, der vom Agenten a nur dann aktiviert wird, wenn die Implementation durch t erfolgen soll.

Sind alle Teilaufgaben delegiert, dann ist die erste Phase beendet. Alle am Team beteiligten Agenten wissen, dass sie Teammitglieder sind. Sie wissen allerdings nicht wie das Team aussieht, insbesondere kennen die Teammitglieder einander noch nicht. Um allen Mitgliedern das Team bekannt zu emachen, wird in der zweiten Phase das Teamnetz explizit konstruiert. Dazu senden die Blätter des Teambaumes Nachrichten an ihre Väterknoten, bis die Wurzel erreicht wird. An der Wurzel ist dann das komplette Team generiert. Die Teamagenten kennen nun alle Teammitglieder, die im Baum unterhalb von ihnen sind. Damit sie das gesamte Team kennenlernen, wird in der dritten Phase von der Wurzel aus, das Teamnetz in Richtung der Blätter verschickt. Damit ist die Teamformation abgeschlossen.

Nach der Teamformation beginnen in der vierten Phase alle Agenten, die Blätter des Teams sind, einen lokalen Plan zu erzeugen. Im Modell generiert der Agent a durch den Kanalaufruf $\mathsf{a{:}provideCtrl}$ diesen lokalen Plan (engl. controler), der das Dienstnetz steuert. Die lokalen Pläne werden an die inneren Agenten des Team weitergereicht, die rekursiv aus den Teilplänen mit Hilfe von Kompromissfindungsalgortihmen einen globalen Plan erzeugen.

An der Wurzel entsteht dann der Teamplan. Dieser ist aber den Teammitgliedern noch unbekannt, so dass er in der fünften Phase von der Wurzel in Richtung der Blätter geschickt wird. Die Blätter lokalisieren dann ihren lokalen Plan anhand des globalen Plans.

Nach dieser Phase der Kompromissfindung wird in der sechsten Phase der Teamplane ausgeführt. Dazu wird der Teamdienst auf dem Platz Teamdienste

instantiiert und mit all den beteiligten Planern konfiguriert. Während der Ausführung des Teamdienstes sorgen die die Planer dafür, dass im Dienstnetz genau die Aktivtäten, die der Teamplan vorsieht, ausgeführt werden.

In ganz analoger Weise findet das Teamwork der Ordnung $n = 2$ statt. Teamwork der Ordnung $n = 2$ hat die Aufgabe, das Organisationsmodell der Ordnung $n = 1$ zu modifizieren. Das Meta-Modell aus Abbildung 12.15 erlaubt nur die Modifkation, bei der im Modell aus Abbildung 12.15 die Transition t_5 gelöscht wird. Diese Transformation erhält insbesonder die Korrektheit des Organisationsnetzes. Bevor ein Transformationsteam gebildet wird, sperrt das Meta-Modell den Beginn neuer Teamaktivitäten auf der Ebene $n = 1$ und wartet, bis alle begonnenen Teamaktivitäten abgeschlossen sind. Danach werden alle Agenten aus dem Modell deregistriert. Sie sind danach nur noch auf der Ebene $n = 2$ aktiv und können jetzt beginnen, ein Transformationsteam zu erzeugen. Das Teamwork der Meta-Ebene vollzieht sich ganz analog zu dem der Ebene $n = 1$, d.h. wiederum in genau den beschriebenen sechs Phasen. Als Ergebnis erhalten wir ein Transformationsteam, das eine Transformationsplan erzeugt, der sich auf den Transformationsdienst in Abb. 12.19 bezieht. Die einzige Besonderheit dieser Dienst ist, dass sie sich bei der Ausführung noch auf das Modell der Ordnung $n = 1$ beziehen können. Im Prototypen aus Abbildung 12.22 geschieht dies mit Hilfe des Kanals $\mathsf{modify}(s_1, s_2)$, mit dem die alte Modellspezifikation s_1 gegen das Ergebnis der Transformation s_2 ausgetauscht wird.

Man erkennt an der graphischen Darstellung der Prototypen in Abbildung 12.20 und Abbildung 12.22, dass sich die Grundstruktur des jeweiligen SONAR-Modells in allen sechs Phasen wiederholt. Als Besonderheit ergibt sich, dass in den ungeraden Phasen: (Organisationsexploration, Bekanntmachung des Teamnetzes und und Lokalisierung des globalen Plans) Informationen von der Wurzel in Richtung der Blättern fließt, während für die geraden Phasen (Teamnetzkonstruktion, Kompromisssuche und Ausführung des Teamplanes) alle Kantenrichtungen in der Organisation umgekehrt werden, da in ihnen Informationen von den Blättern in Richtung Wurzel fließen.

12.5 Organisationsmetriken

Um eine Meta-Planung geignet operationalisieren zu können, müssen wir Optimalitätsfaktoren definieren, die bewerten, ob eine Transformation die Struktur verbessert oder verschlechtert. Dazu definieren wir ein Maße, die eine Organisation bewerten. Diese Maße sind Einflussparameter für die Transformation, denn im allgemeinen lohnt es sich nur dann, eine Organisation zu transformieren, wenn sich die Bewertung verbessert.

Nehmen wir an, dass es n verschiedene Bewertungsmaße einer Organisation gibt und dass sich diese reellwertig quantifizieren lassen. Eine *Organisationsmetrik* ist dann eine Abbildung:

$$v : \mathcal{ORG} \to \mathbb{R}^n$$

Definiere für die Transformationen $f : (Org_1, Ag_1) \mapsto (Org_2, Ag_2)$ die Werte

$v_1 = v(Org_1, Ag_1)$ und $v_2 = v(Org_2, Ag_2) = v(f(Org_1, Ag_1))$. Dann gibt es verbessernde, verschlechternde und unvergleichbare Transformationen f, nämlich dann, wenn mit der partiellen Ordnung $\leq$ auf Vektoren gilt:

Verbesserung:	$v_1 \leq v_2$
Verschlechterung:	$v_1 \geq v_2$
Unvergleichbarkeit:	$v_1 \not\leq v_2 \wedge v_1 \not\geq v_2$

Der Fall der Unvergleichbarkeit tritt also dann auf, wenn f die Bewertung bezüglich einiger Kriterien verbessert, gleichzeitig aber bezüglich einiger anderer Kriterien verschlechtert. Eine eindeutige Bewertung von f ist dann also nicht möglich.

Jede Transformation benötigt Ressourcen, beispielsweise Zeit oder Geld. Wir nehmen an, dass es m verschiedene Ressourcentypen gibt. Wir treffen die Annahme, dass sich die Transformation f in ihrem Bedarf für alle Argumente (Org_1, Ag_1), d.h. für alle Organisationen, gleich verhält. Diese Annahme der Uniformität ist plausibel, da unsere Transformationen sich von Transformationsmustern ableiten, und diese verhalten sich für alle Organisationen gleich, da sie nur auf ihrem Muster arbeiten und den weiteren Kontext, in dem sie das Muster vorgefunden haben, ausblenden. Unter dieser Annahme lassen die Kosten einer Transformation durch eine Abbildung in die nicht negativen Zahlen modellieren, die sich durch die Summe der Einzelkosten ergibt:

$$c : \mathcal{TM} \to \mathbb{R}_+$$

Für eine gegebene Transformation f, die wir auf eine MAS-Organisation (Org, Ag) anwenden, berücksichtigen wir die drei Größen

$$v_1 = v(Org, Ag), \qquad v_2 = v(f(Org, Ag)) \qquad \text{und} \quad c(f),$$

um zu entscheiden, ob die Transformation f vorgenommen werden soll. Hierbei können die drei Größen unterschiedlich verknüpt werden. Ein einfaches Kriterium ist es, im Falle $v_1 \leq v_2$ den Quotienten aus der absoluten Verbesserung $v_2 - v_1$ und den Kosten heranzuziehen, also: Verbesserung pro Kosten. Die Verbesserung gewichten wir dabei noch linear mit $a \in \mathbb{R}_+^n$:

$$eval(f, Org, Ag) := \frac{a(v(f(Org, Ag)) - v(Org, Ag))}{c(f)}$$

Der Gewichtungsfaktor a kann im Falle unvergleichbarer MAS-Organisationen entscheiden, welche der n Kriterien stärker zu berücksichtigen sind.

Mit diesem Maß versehen ist es naheliegend, unsere Reorganisation so zu gestalten, dass $eval(f, Org, Ag)$ maximiert wird. Reorganisation reduziert sich damit dann zu einem Optimierungsproblem. Offen ist bislang noch, auf welche Maße sich die Metrik stützt. Betrachten wir im folgenden einige naheliegende Kandidaten.

Zunächst halten wir fest, dass wir bereits ein grundlegendes Instrument zur Bewertung der Organisationsstruktur kennengelernt haben, nämlich die Wohlgeformtheit und die Charakterisierung der Tätigkeitspfade bezüglich der sicheren Bearbeitbarkeit von Aufgaben. Dieses Maß ist ein ausschließendes, da nur wir nur wohlgeformte Organisationen heranziehen wollen. Betrachten wir nun, welche weiteren möglichen Bewertungen existieren.

Organisationsnetz Die Wohlgeformtheit einer Organisation impliziert bereits eine Vielzahl wünschenswerter Eigenschaften. So gibt es keine unnützen Teams, es gibt keine Teamprozesse, die nicht korrekt gesteuert würden usw. Die Organisation ist somit funktional korrekt – ein für den praktischen Einsatz wichtige Eigenschaft, die wir hier aber nicht in die Bewertung mi taufnehmen können, da wir ja nicht wohlgeformte Organisationen von der Betrachtung ausgeschlossen haben.

Darüberhinaus können wir die Organisation als Netzwerk analysieren. Eine Kenngröße ist der Alternativgrad einer Organisation, die sich in der Anzahl der Alternativen bemisst, die zu einer Ausführung einer Aufgabe herangezogen werden können. Diese Größe können wir folgendermaßen quatifizieren:

$$\max\{|p^\bullet| : p \in P\} \tag{12.5}$$

Eine damit verwandte Kenngröße misst die Delegationsverzweigung, d.h. die Anzahl der Subtasks, die zur Bewältigung einer Aufgabe herangezogen werden. Diese Größe können wir folgendermaßen quantifizieren:

$$\max\{|t^\bullet| : t \in T\} \tag{12.6}$$

Rollenredundanz Rollen- und Dienstnetzzuweisung liefern wichtige Bewertungen beim Zuschnitt der Position. Die Positionen sollen nämlich einerseits allumfassend sein, um die Kommunikationskosten und den Overhead, der durch Aufteilung der Aufgaben entsteht, gering zu halten. Andererseits ist eine Verteilung und Spezialisierung wünschenswert, da sie eine leichte Wartbarkeit und Lastverteilung ermöglichen.

Die Rollenredundanz bezogen auf Positionen können wir berechnen, indem wir $R({}^\bullet O \cap T)$ als Multimengen betrachten und damit die folgende Multimenge definieren:

$$Red(N) := \sum_{O \in \mathcal{O}} R({}^\bullet O \cap T)$$

Für jede Rolle $r \in Rol$ gibt $Red(N)(r)$ die *Redundanz* von r an. Das Rollenredundanzmaß ergibt sich dann folgendermaßen:

$$\frac{\sum_{r \in Rol} Red(N)(r)}{|Rol|} \tag{12.7}$$

Die Redundanz schätzt grob die Spezialisierung der einzelnen Positionen ab. Eine hohe Spezialisierung ist einerseits sinnvoll, da sie die Teamformation erleichtert, andererseits ist Redundanz sinnvoll, um Alternativen zu besitzen.

Dienstüberlappung Wir wollen nun betrachten, wie sehr sich die Positionen bezüglich der von ihnen angebotenen Dienste $D(T \cap O)$ überlappen. Dazu müssen wir definieren, wann sich Dienste überschneiden. Die in einem Dienstnetz verwendeten Typen liefern einen Hinweis, wie groß die Übereinstimmung ist, vorausgesetzt natürlich, dass das Typsystem, d.h. die Systemenontologie, fein genug modelliert ist. Die Menge der in D verwendeten Typen ist:

$$\{d(p) \mid p \in P_D\}$$

Zwei Dienste D_1 und D_2 stehen miteinander in Verbindung, wenn es einen Typ gibt, der in beiden genutzt wird. Diese Relation auf Dienstnetzen bezeichnen wir mit R_{Dienst}:

$$(D_1, D_2) \in R_{Dienst} : \Longleftrightarrow \exists p_1 \in P_1 : \exists p_2 \in P_2 : d(p_1) = d(p_2)$$

Man kann die Aussagekraft noch verbessern, wenn man elementare Typen wie Integer usw. von der Betrachtung ausnimmt. Die Relation R_{Dienst} ist reflexiv und symmetrisch. Wir können daher die Bezirke $C \in \textsc{Bez}(R_{Dienst})$ der Relation R_{Dienst} berechnen, d.h. die maximalen Mengen von Diensten, die paarweise miteinander in Relation stehen. Die Bezirke entsprechen in der ersten Näherung Datenspeichern, die verwandte Datentypen und ihre Instanzen aufnehmen. Typen, die nicht gemeinsam verwendet werden, können in verschiedenen Datenspeichern abgelegt werden.

Das Überlappungmaß ist die kumulierte Anzahl der Gemeinsamkeit der Positionen mit den Bezirken:

$$\sum_{O \in \mathcal{O}} |\{C \in \textsc{Bez}(R_{Dienst}) : C \cap D(T \cap O) \neq \emptyset\}| \tag{12.8}$$

Dieser Wert ist besonders groß, wenn Positionen an vielen Bezirken partizipieren, d.h. wenn sie an vielen Datenspeichern angeschlossen sind.

Diese Information können wir ebenfalls für die Implementation nutzen, denn die von mehreren Positionen gemeinsam genutzten Typen definieren Cluster, die zum schnelleren Zugriff auf die mit den Typen assoziierten Daten auf einem physikalischen System verwaltet werden. Diese Anforderung tendiert dazu, zentralisierte Ansätze zu bevorzugen. Dies steht meist jedoch im Widerspruch zu der Forderung nach einer physikalischen Dezentralisierung. Zwischen diesen beiden Punkten muss ein Ausgleich gefunden werden. Hierbei ist das Überlappungsmaß ein wichtiges Hilfsmittel.

Teamwork Eine weitere interessante Größe betrifft die Teamaktivität. Hierbei versuchen wir abzuschätzen, wie positiv sich die organisationale Koordinierung durch die Teambildung und die Steuerung auswirkt. Es ist anzustreben, dass die Organisation für den einzelnen Agenten eine Reduktion des Koordinierungsoverheads bedeutet, und dass die Steuerung eine Vergrößerung des Entscheidungsspielraum bedeutet, da „irrelevante“ Möglichkeiten ausgeblendet werden. Die Gefahr, die dabei droht, ist natürlich, auch relevante, interessante Prozesse auszublenden. Wollen wir dies quantifizieren, so sind wir darauf angewiesen, dass wie jedem Ablauf eines Dienstes eine Bewertung geben können. Sei $M_0 \xrightarrow{w} M_f$ ein korrekter Ablauf von D. Diesen bewerten wir mit der Abbildung v_π.

Nun vergleichen wir zu einer Rolle $R \in \mathcal{R}$ den Mittelwert $\bar{v}_0$ aller Abläufe der Menge

$$\bar{v}_0 := \text{avg}\left\{ v_\pi(w) : M_0 \xrightarrow[D]{w} M_f, R(D) = R, D \in \mathcal{D} \right\}$$

mit dem Mittelwert $\bar{v}_{Org}$ der Menge aller Abläufe, den die gesteuerten Teams

$D(G) \times \hat{\psi}(G)$ der Organisation erzeugen:

$$\bar{v}_{Org} := \text{avg}\Big\{ v_\pi(w) : M_0 \xrightarrow[D(G)\times\hat{\psi}(G)]{w} M_f, \quad G = G(K,\phi), \\ (K,\phi) \in \mathcal{K}^{pg}(N,\{p\}), p \in Start_{Org}(R) \Big\}$$

Der Quotient der beiden Größen ist dann ein Maß für die Verbesserungen durch die organisationelle Koordinierung:

$$\frac{\bar{v}_{Org}}{\bar{v}_0} \tag{12.9}$$

Natürlich hängt das Maß in problematischer Art und Weise von der geschickten Wahl der konkreten Bewertung der Abläufe $v_\pi(w)$ ab. Sie generell zu definieren ist praktisch nicht möglich. Nur wenn man den einzelnen Tätigkeiten t von D Kosten und Nutzen zuweisen kann, mag dies für diesem konkreten Spezialfall gelingen.

Daneben kommt es auch auf die Größe des Regelwerks an, denn die Regeln müssen leicht zu befolgen sein, damit sie die Agenten internalisieren können. Außerdem stellt sich die Frage, ob überhaupt noch die richtigen Prozesse geregelt werden, oder ob man mit einer Vielzahl an Regeln versucht, solche Aktivitäten auszuschließen, die von den Organisationsmitgliedern aufgrund externer Einflüsse gar nicht gewählt werden.

Zusammenfassung

In diesem Kapitel haben wir Reorganisationsprozesse als spezielle organisationale Aktivität behandelt. Reorganisation werden durch Organisationstransformationen vorgenommen, d.h. durch formale Abbildungen, die Organisationen wiederum auf Organisationen abbilden.

Wir haben speziell solche Transformationen untersucht, die vom System selbst erbracht werden. Diese Selbstorganisation wird durch Transformationsteams erbracht, in denen jeder Agent nur spezielle Transformationen vornehmen darf, nämlich eine Teilmenge der lokalen Transformationen, die wir als transparent bezeichnet haben, weil ihre Wirkung auf die Interna des transformierenden Agenten beschränkt bleibt. Aus diesem Grund lässt sich die auf den Agenten lokalisierte Transformation als Meta-Planung des SONAR-Agenten auffassen, da diese ja ebenfalls die Interna modifiziert.

Weiterhin haben wir untersucht, welche elementaren Tranformationen auf Organisationen wir unterstützen wollen, nämlich beispielsweise die Vergröberung und Verfeinerung von Positionen oder von von Tasks; die Aufspaltung und Verschmelzung von Positionen; das Umlenken von Delegationsbeziehungen; das Generieren und Löschen von Delegationsbeziehungen oder von Tätigkeiten und Aufgabenprofilen. Dies erzeugt einen Basissatz an Transformation.

Für die Agenten ist darüberhinaus noch wichtig, entscheiden zu können, wann Transformationen nützlich sind. Dazu muss der Agent den Aufwand einer Transformation zu der Verbesserung ins Verhältnis setzen. Um die Verbesserung einer

Transformation bewerten zu können, haben wir Organisationsmetriken eingeführt, die jeder Organisation eine mehrdimensionale Bewertung auf Basis des Organisationsnetzes, des Organigramms, der Rollenredundanz und der Dienstüberlappung zuweist.

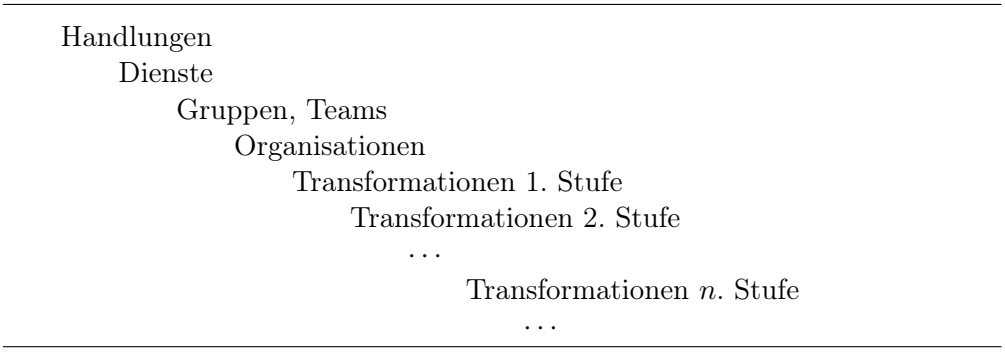


Abbildung 12.24: Koordinierungsmechanismen

Transformationen bilden eine Form der Koordination, mit der eine Organisation reflexiv auf sich selbst einwirkt. Transformationsregeln stellen hierbei Meta-Strukturen der Organisation dar, d.h Strukturen zweiter Ordnung. So wie Transformationsregeln auf die Organisationsstrukturen einwirken, so existieren Regeln zweiter Stufe, die ihrerseits auf die Transformationsregeln einwirken. Diese Regeln der zweiten Stufe sind dann Organisationsstrukturen der dritten Ordnung. Diese Schichtung setzt sich im Prinzip unbegrenzt fort. Mit SONAR haben wir somit einen unbegrenzten Stapel an Koordinierungsmechanismen zur Selbstorganisation formalisiert (vgl. Abb. 12.24): Auf der untersten Stufe strukturieren Dienste die Menge der Handlungsprozesse. Auf der zweiten Stufe finden sich die Teams, die aus der Menge aller Dienste einen speziellen auszeichnen: den Teamdienst. Die Menge aller Teams wird wiederum durch die Organisation generiert. Die Organisation selbst enthält dann alle Stufen der Transformation.

Nach dieser Untersuchung der formalen Organisation widmen wir uns im folgenden Kapitel den Wechselwirkungsformen mit den informellen Anteilen.

13 Agentensysteme als Interaktion von Organisation und Mitgliedern

Eine Organisation ergibt sich als die Verschränkung der formalen Organisation mit ihrem informellen Anteil, der sich durch die Organisationsmitglieder ergibt. In unserem Fall geschieht dies, indem wir jeden Positionsagenten mit einem Mitgliedsagenten koppeln. Der Mitgliedsagent füllt den Positionsagenten mit „Leben“ an. Damit erweitern wir – aufbauend auf unseren Vorarbeiten in (Köhler-Bußmeier u. a., 2008, 2009) – den SONAR-Ansatz hin zu einem Entwicklungsmodelle, analog zu bestehenden wie beispielsweise MASE (DeLoach u. a., 2001), GAIA (Zambonelli u. a., 2003), Taems (Nagendra u. a., 1996), TROPOS (Bresciani u. a., 2004), OMNI (Dignum u. a., 2004), Tropos (Bresciani u. a., 2004), MOISE (Boissier u. a., 2000) und ODML (Horling und Lesser, 2005b).

13.1 Positionen und Organisationsmitglieder

Betrachte die komplette Organisation in Abbildung 13.1, bei der sich zwei Firmen zu einer virtuelle Organisation zusammengeschlossen haben. Die Elemente, die sich in der Abbildung innerhalb des mit „virtuelle Organisation“ beschrifteten Bereichs befinden, stellen die formale Organisation dar, die aus der Organisationsstruktur, den Positionen (hier: der Initiator, der Koordinator und die beiden Firmenrepräsentanten) und den Aufgaben besteht. In der agentenorientierten Umsetzung des Modells wird jede Position durch einen Agenten implementiert. Obwohl jetzt Agenten im Spiel sind, handelt es sich immer noch um die formale Organisation, denn die Agenten implementieren nur die mit der Position verbundenen Handlungsstrukturen. Von der Position streng zu trennen ist aber der Positionsinhaber – das Organisationsmitglied.

Um die Organisation zu erhalten, müssen wir alle Positionen mit Mitgliedern besetzen. In der Abbildung ist dies durch zusätzliche eingefügte Agenten dargestellt. Man beachte, dass diese *Mitgliedsagenten* für die Organisation *extern* sind, denn Organisationsmitglieder sind nach strenger theoretischer Auffassung nicht Bestandteil der Organisation, sondern nur durch Mitgliedschaft mit ihr assoziiert – in der Abbildung durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Der Mitgliedsagent, der die Position implementiert, kommuniziert mit dem Positionsagenten, der seine einzige Schnittstelle zur Organisation darstellt. Durch die Rollen der Position ist festgelegt, welche Fähigkeiten der Agenten mitzubringen hat und welche Aktivitäten er ausführen muss. Formale Organisation und ihre Mitglieder bilden zusammen die informelle Organisation. Daneben gibt es auch noch die Agenten, die mit keiner Positionen assoziiert sind. In der Abbildung 13.1 ist diese der Agent links unten. Solche Agenten sind weder Bestandteil der formalen noch der informellen Organisation.

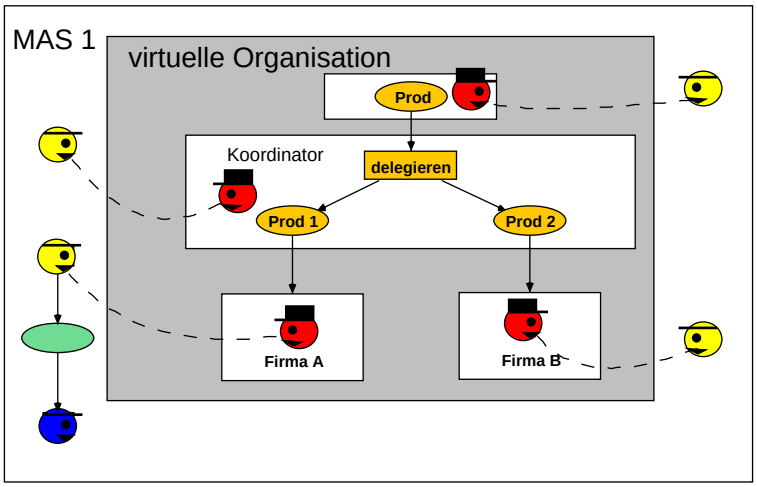


Abbildung 13.1: Implementation der formalen Organisation

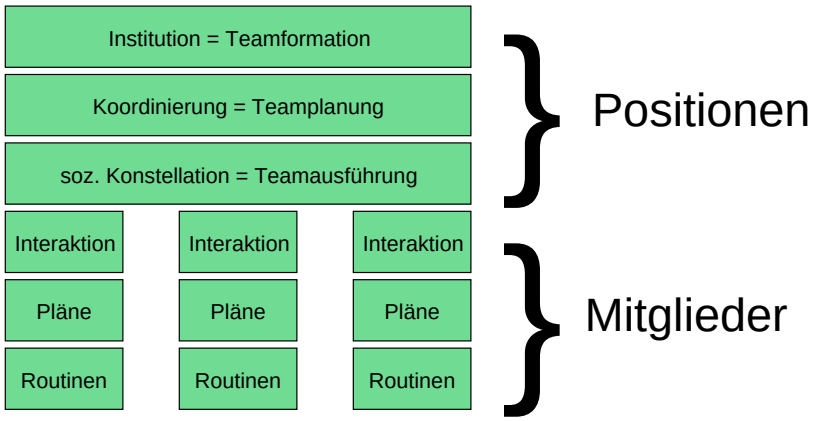


Abbildung 13.2: Dualität von Positionen und Mitgliedern

Die Position ist ein Akteur, der mit Abläufen auf die Umwelt reagiert. Diese Abläufe werden zwar von Mitgliedern der Organisation getragen, sind jedoch gleichzeitig in ihrer Existenz von ihnen unabhängig, da ihre Grundstruktur von den Positionsagenten, also der formalen Organisation, bereits festgelegt ist. Es liegt nahe, das in Kapitel 8 dargestellte Akteursmodell unter dem Blickwinkel von formalen wir informalen Organisationselementen zu betrachten, denn die Art und Weise, wie die Position agiert, entspricht denen eines SONAR-Agenten (vgl. dazu Abbildung 13.2). Die von den Positionen getragenen organisationalen Transformationen stellen die Institutionalisierungsprozesse dar, die Teamplanung entspricht der Koordination und die Teamformation erzeugt die institutionalisierten Konstellationsarten, innerhalb dessen die Mitglieder agieren. Wir erkennen hier die in Abbildung 8.17 dargestellte selbstähnliche Korrespondenz von Mikro- und Makroprozessen wieder. Positionen und Mitglieder sind somit unterschiedliche Perspektiven auf das Organisationsgeschehen, die beide gleichermaßen relevant sind und auch beide in der SONAR-Architektur repräsentiert werden.

Diese Trennung in Positions- und Mitgliedsagenten mag einem auf den ersten Blick redundant erscheinen. Sie ist aber auch in hohem Maße auch im praktischen Kontext der Software-Entwicklung nützlich, nämlich immer dann, wenn die Entwicklung der Organisation getrennt von der ihrer Mitglieder vorgenommen wird. Dies ist beispielsweise typisch für die Entwicklung von Handelsplattformen aus dem Bereich des *e-commerce*, hier speziell der Bereich: *business to business (B2B)*. Hier sollen Agenten verschiedener Unternehmen bei der Anbahnung und Abwicklung elektronischer Verträge unterstützt werden. Aus Sicht der Plattform sind dazu Handelsregeln für die Preisfindung und die Vertragsabwicklung zu entwickeln. Da die Agenten der Marktteilnehmer jedoch in den Unternehmen entwickelt werden, kann die Entwicklung nur die formale Organisation betrachten. Bei der Analyse der Plattform können daher keine spezifische Eigenschaften der Mitgliedsagenten angenommen werden. Daher ist allein eine Kontrolle der Mitglieder durch die von den Positionsagenten überwachten organisationalen Handelsregeln in diesem Szenario sinnvoll. Von dieser Trennung unbenommen bleibt die Tatsache, dass das Wechselspiel von konkreten Positionen und Mitgliedern eine adjustierende Anpassung der Handelsregeln – im Sinne einer Ordnungspolitik der Organisation – nötig werden lässt.

Man beachte, dass die Organisation nur bestimmt, wie sich die Rollen und Positionen der Organisation zueinander verhalten. Es wird nicht erzwungen, dass ihre Mitglieder mit den Positionen identisch sind. Das implementierende Multiagentensystem besteht daher mindestens aus den Mitglieder, der informellen Organisation also, kann aber auch weitere externe Agenten enthalten, mit denen die Mitglieder informelle Kanäle unterhalten (vgl. Abbildung 13.1).

Bei der Besetzung besteht nicht notwendigerweise eine direkte Korrespondenz von Position und Mitglied. Es ist auch möglich, dass eine Agent mehrere Positionen besetzt. So ist es möglich, dass der Repräsentant der Firma A auch gleichzeitig als Koordinator tätig wird.

Der externe Mitgliedsagent kann nur mittels des Positionsagenten an den orga-

nisationalen Prozessen teilzunehmen.[1] Positions- und Mitgliedsagent teilen sich die Planung der organisationalen Prozesse. Teamwork umfasst drei Teilaspekte:

1. Die Teamformation: Sie generiert mit Hilfe des Organisationsnetzes und der Teamgenerationsfunktion γ ein Team G.

2. Die Teamplanung: Sie stellt sicher, dass alle lokalen Handlungspläne auch Teampläne sind, d.h. Prozesse, der die Steuerbedingung erfüllen: $\pi_A(G)(D)(p) \in Proc(D(G), \hat{\psi}(G))$.

3. Die Ausführungskontrolle: Die kontrollierte Ausführung des Teamplans stellt zur Laufzeit sicher, dass sich der Mitgliedsagent an das Teamnetz $D(G)$ und an die Teamsteuerung $\hat{\psi}(G)$ hält.

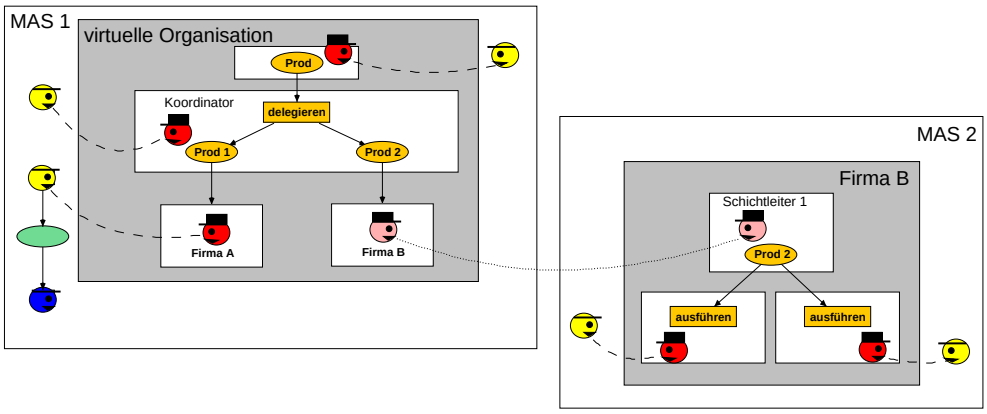


Abbildung 13.3: Organisationen als Organisationsmitglieder

Diese dualistische Sichtweise passt auch zur Perspektive der Organisationsverbünde. Abbildung 13.3 zeigt den Positionsagenten der Firma B, der nicht durch einen normalen Mitgliedsagenten, sondern wiederum durch eine Organisation implementiert wird. Hier fungieren somit Organisationen als Organisationsmitglieder. Das Modell ist somit rekursiv.

13.2 Die Organisation als Plattform

Aus der Sicht aller Agenten (Positionen, Mitglieder und Externe) dient die Organisation als Dienstleister, gewissermaßen als logische Plattform. Ihre zentrale Aufgabe ist die Verwaltung der Positionsbesetzungen, also die Verbindung von Positionsagenten und Mitgliedsagenten. Wir können diesen Aufbau mit dem eines allgemeinen Multiagentensystems vergleichen (vgl. dazu die Abbildung 13.4[2]). Ein Multiagentensystem ist das Netzwerk von Agentenplattformen.

[1] Hier verweisen wir auf die sozialtheoretische Besonderheit, dass es die Rollen der Organisationspostionen sind, die an organisationalen Prozessen teilnehmen, nicht aber – wie man denken könnte – die Akteure, die diese Rollen innehaben.

[2] Es handelt sich bei der Abbildung um die Grobarchitektur des MULAN-Systems nach (Rölke, 2004).

Jede Agentenplattformen. stellt für die von ihr verwalteten Agenten eine Laufzeitumgebung dar, die u.a. für die Nachrichtenkommunikation die aller Agenten im System die technischen Voraussetzung schafft. Die Interaktion der Agenten untereinander wird durch Protokolle gesteuert.

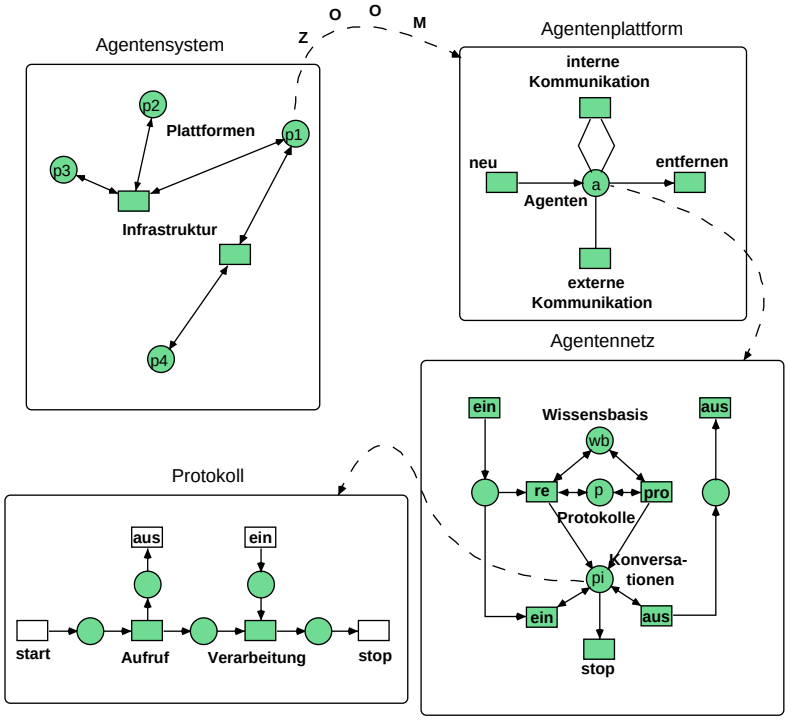


Abbildung 13.4: Grobstruktur eines Agentensystems (Abb. 7.2 in Rölke, 2004)

Abbildung 13.5 zeigt dagegen die Struktur eines organisationsorientierten SONAR-Multiagentensystems: Auf der obersten Abstraktionsebene ist die formale Organisation *Org*, hier dargestellt als ein Netzwerk aus holonischen Positionen. Die holonischen Positionen werden in Form der Positionsagenten implementiert und stellen ihrerseits den Kontext für die weitere holonische Agenten sowie die Positionsagenten dar. Man erkennt sofort, dass die Organisation das strukturierte Pendant zum Agentensystem ist und der holonische Positionsagent das der Plattform.

Um die Besetzungen der Positionen zu verwalten, hält die Organisation alle offenen Stellenausschreibungen vorrätig, die von allen Agenten eingesehen werden können (vgl. dazu das Protokoll in Abb. 13.6). Im Allgemeinfall wird eine Stelle ausgeschrieben, sobald das aktuelle Mitglied aus der Organisation scheidet. Eine Ausnahme liegt bei der Initialisierung vor, bei der noch gar keine Mitglieder vorhanden sind und daher alle Stellen zunächst ausgeschrieben werden.

Ein Mitglied scheidet aus der Organisation aus, indem das Mitglied den Vertrag kündigt oder ihm von der Position gekündigt wird. In einem realen Multi-

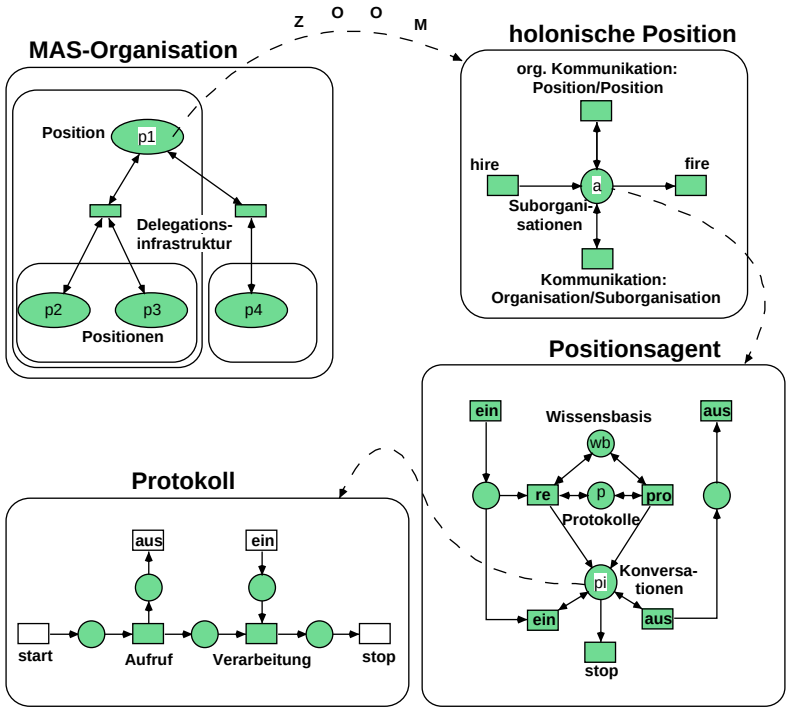


Abbildung 13.5: Struktur eines organisationsorientierten SONAR-MAS

agentensystem kann dies bedeuten, dass die aktuelle Implementierung der Positionsaufgaben durch eine neuere Version ersetzt wird. Kündigungen modellieren dann den Update-Vorgang in Form einer dynamischen Bindung. Kündigungen können aber auch ein Ausdruck der Fehlerbehandlung sein, die bei der Ausführungskontrolle (s.u.) auftreten kann.

Der betroffene Positionsagent, dessen Mitglied ausscheidet, regelt den Übergang vom ausscheidenden Mitglied zu seinem Nachfolger. Die Mitgliedschaft eines ausscheidenden Agenten endet erst, wenn alle laufenden Teamaktivitäten, in denen das Mitglied involviert ist, beendet sind – und sei es nur, dass sie kontrolliert abgebrochen werden. Der Positionsagent leitet daher die laufenden Teamaktivitäten an den auscheidenden Agenten weiter, während die im Nachfolgenden begonnenen Teamaktivitäten schon vom Nachfolger bearbeitet werden. Im allgemeinen sind also in der Übergangszeit – wenn auch typischerweise nur für relativ kurze Zeit – mehrere Agenten als Besetzung einer Position tätig.

In der praktische Umsetzung wird die Kommunikation von Mitglied und Position sowie innerhalb der Positionen durch kryptographische Techniken abgesichert. Bei der Initialisierung der Organisation werden alle Positionsagenten erzeugt. Außerdem generiert die Organisation für jeden erzeugten Positionsagenten einen asymmetrischen Schlüssel. Bei der Erzeugung wird jedem Positionsagent sein eigener Schlüssel sowie der öffentliche Schlüssel der Organisation mitgeteilt.

Die Organisation verwaltet die öffentlichen Schlüssel aller Positionsagenten

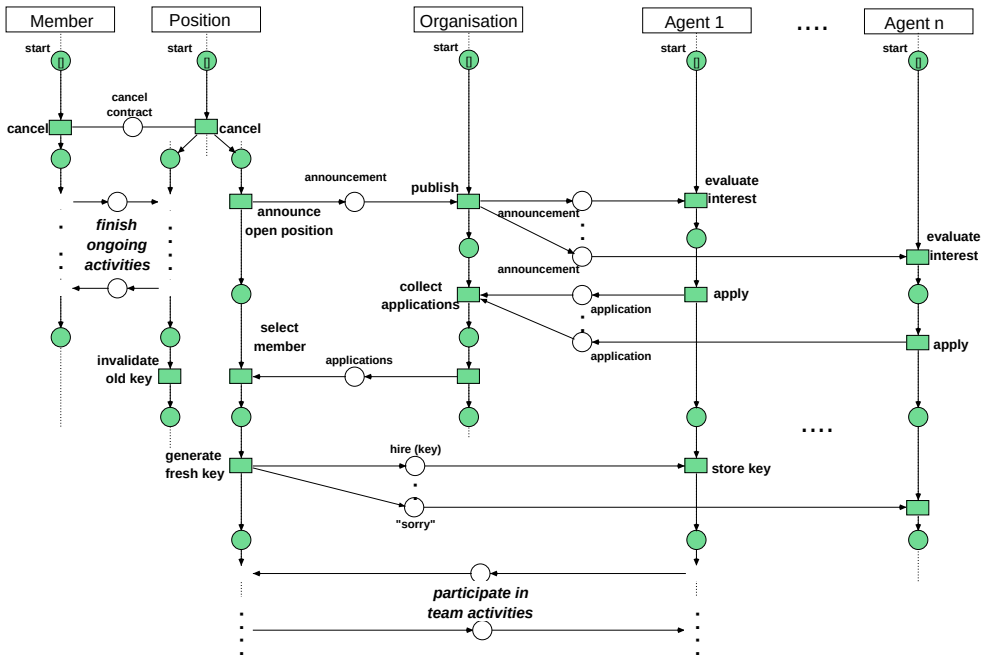


Abbildung 13.6: Protokoll zur Bindung von Position und Mitglied

und versendet diese – mit seinem eigenem Schlüssel signiert – auf Anfrage. Er agiert also als *Key-Server* der Organisation.

Die Schlüssel der Positionsagenten dienen dazu, die Nachrichten, welche die Positionsagenten einander schicken, zu signieren, so dass deren Herkunft kontrolliert werden kann. Dies verhindert, dass sich externe Agenten als Positionen ausgeben können. In einer Organisation wird also sichergestellt, dass nur Positionsagenten und auch nur solche, die dazu laut Organisationsnetz authorisiert sind, miteinander kommunizieren.

Die Kommunikation zwischen Position und Mitglied wird ebenfalls durch Verschlüsselung abgesichert. Dazu generiert der Positionsagent für die aktuelle Besetzung einen frischen Schlüssel und teilt ihn dem Mitgliedsagenten in dem Moment mit, in dem dieser eingestellt wird. Erst die Kenntnis des Schlüssels zeichnet den Agenten als Mitglied der Organisation aus.

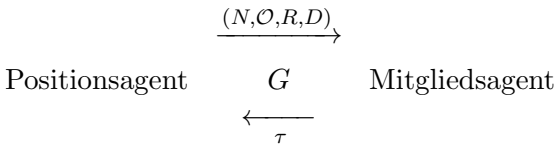
Ein Agent kann nur mittels der Position als Organisationsmitglied mit anderen Mitgliedern kommunizieren. Wenn ein Mitgliedsagent eine Nachricht im Kontext seiner organisationalen Tätigkeit versenden will, so schickt er sie zunächst an seinen Positionsagenten. Diese Kommunikation wird durch den gemeinsamen symmetrischen Schlüssel abgesichert. Der Positionsagent signiert die Nachricht und schickt sie an den gewünschten Positionsagenten. Dieser überprüft die Signatur, signiert seinerseits und leitet die Nachricht an sein Mitglied weiter. Durch diesen Mechanismus können die Mitglieder einer Organisation Nachrichten, die ein Agent in seiner Aufgabe als Mitglied versendet, von solchen unterscheiden, die ein Agent als „Privatperson“ versendet.

13.3 Teamwork: Formation, Planung und Ausführung

Die drei organisationalen Aufgaben, die Positionen wahrnehmen, sind – wie wir bereits in Abbildung 11.14 illustriert haben – die Teamformation, die Teamplanung und die Planausführung. Betrachten wir diese Prozesse im folgenden unter Einbezug der Mitglieder (siehe dazu auch Köhler und Wester-Ebbinghaus, 2007a; Köhler-Bußmeier und Wester-Ebbinghaus, 2008; Köhler-Bußmeier u. a., 2009).

13.3.1 Teamformation

Die Teamformation geschieht anhand der Teamgenerationsfunktion γ_A. Sie löst – wie bereits dargelegt – den Nichtdeterminismus im Organisationsnetz auf, um ein Team G zu erzeugen. Jeder Positionsagent A delegiert dabei Teilaufgaben an andere Positionsagenten $A_1, \ldots, A_m$, die ihrerseits rekursiv jeweils ein Teilteam erzeugen, das von A zu einem gemeinsamen Team zusammengesetzt wird. Der Positionsagent gibt die durch das Organisationsnetz $(N, \mathcal{O}, R, D)$ die Grundstruktur vor, während der Mitgliedsagent – typischerweise in Absprache mit der Position – durch dem Teamkonstruktur τ die Partner auswählt:



Hierbei ist essentiell, dass es die Positionsagenten A_i im Prinzip *nicht ablehnen* können, die Teilaufgaben zu bearbeiten. Als Teil Organisation sind sie zur Bearbeitung im Prinzip verpflichtet.

An dieser Stelle formulieren wir die Verpflichtung bewusst mit dem Attribut „im Prinzip“, denn wenn der Agent eine Aufgabe aktuell nicht bearbeiten kann, beispielsweise weil er überarbeitet ist, dann existieren unterschiedliche Szenarien: der Agent bearbeitet die Aufgabe mit großer Verzögerung; der Agent kann eventuell im Ausnahmefall die Aufgabe ablehnen; der Agent kann die Aufgabe ablehnen, muss aber eine Strafe ableisten usw.

Welche der Varianten realisiert wird, hängt von der konkreten Implementation der Interaktion von Position und Mitglied ab. Verschiedene Implementation entsprechen dabei unterschiedlichen Organisationsstrukturen.

Ein Beispielprotokoll zur Teamformation zeigt die Abbildung 13.7. Hier fragt der delegierende Agent zunächst bei n Agenten an, ob und wie sie die Aufgabe erfüllen können. Anhand der Antworten entscheidet er sich für eine Teilmenge von m Agenten, an die er delegiert und die die Subteams erzeugen. Für die Darstellung einer Implementierung dieses Algorithmus mit Hilfe gefärbter Petrinetze wird auf (Köhler-Bußmeier und Wester-Ebbinghaus, 2008) verwiesen.

13.3.2 Teamplanung

Der Positionsagent gibt durch die Teamplanung, d.h. durch die Generierung von $G = G(K, \phi)$ das Dienstnetze $D = D_\Delta(\delta)[R(p)]$ und die Steuerung $\hat{\psi}(G)$ vor,

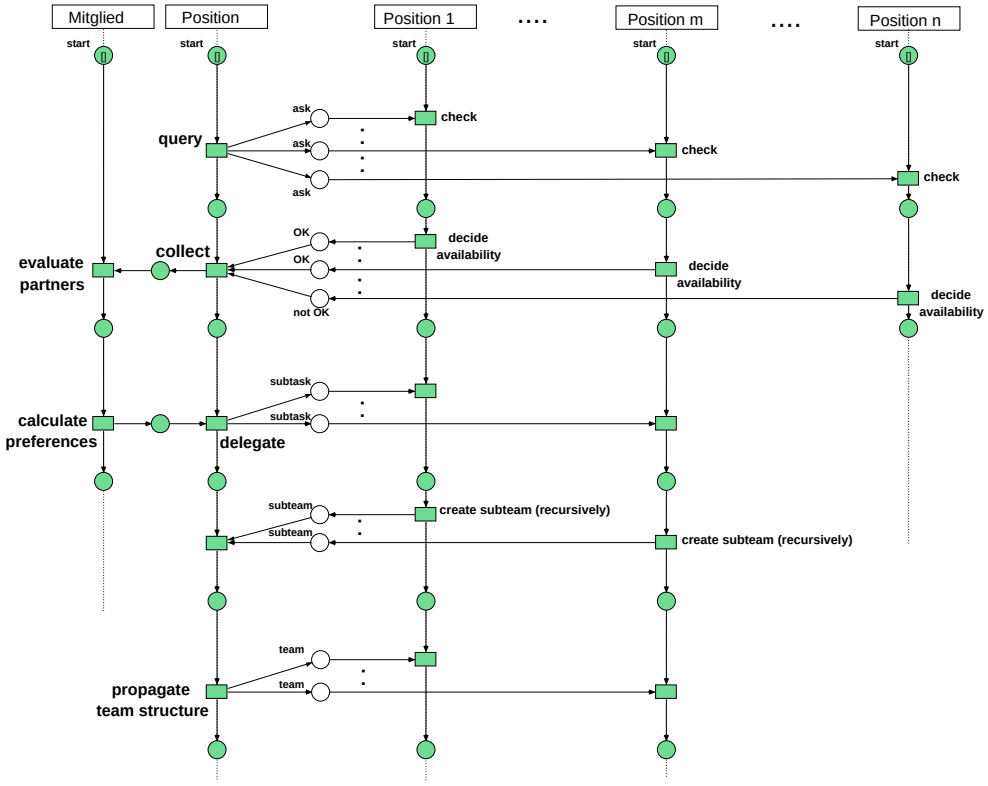


Abbildung 13.7: Protokoll zur Teamformation

während der korrespondierende Mitgliedssagent – typischerweise in Absprache mit der Position – den Plan $\pi = \pi(G)(D)(p)$ auswählt:

$$\text{Positionsagent} \quad \underset{\xi,\pi_G}{\overset{D(G),\hat{\psi}(G)}{G}} \quad \text{Mitgliedsagent}$$

In einer konkreten Implementierung wird der Mitgliedsagent eine Präferenz auf allen möglichen Teamplänen $\pi \in \mathit{Proc}(D(G), \hat{\psi}(G))$ besitzen. Die in dem Team G partizipierenden Positionsagenten handeln untereinander aus, wie die Präferenzordnungen der Mitglieder in Einklang gebracht werden, so dass ein Kompromiss in Form eines Teamplans π_G gefunden wird.

Auch hier existieren in Abhängigkeit der Ausprägung der Organisation unterschiedliche Szenarien: der Mitgliedsagent muss den von den Positionsagenten ausgehandelten Kompromiss stets akzeptieren; er kann den Kompromiss ablehnen und nach Anpassung der Präferenz auf eine Neuverhandlung bestehen usw.

Außerdem kann es Autoritätsbeziehungen zwischen den Positionen geben, die gegebenenfalls absolut gelten oder abhängig vom Team sind. Welche der Varianten realisiert wird, hängt auch hier von der konkreten Implementation der Position/Mitglied-Interaktion ab. Für die Kompromissfindung, d.h. für die Konstruktion von $KS_\xi(G)$ nach Algorithmus 11.23, gilt beispielsweise, dass die Entscheidungen relativ zur Teamstruktur getroffen werden.

Ein Beispielprotokoll zur Teamplanung zeigt die Abbildung 13.8, bei dem die Positionsagenten eine Kompromiss aushandeln, wobei der Kompromiss für die Mitgliedern bindend ist.

13.3.3 Planausführung

Da der Positionsagent in wohlgeformten Organisation die Einhaltung der organisationalen Bedingungen garantiert, hat dies zur Auswirkung, dass der Mitgliedsagent eigentlich gezwungen ist, sich gemäß der organisationalen Regeln zu verhalten.[3] Dies kann jedoch aus der Sicht des Positionsagenten nicht erzwungen werden, da die Agenten weiterhin ihre Autonomie behalten. Der Mitgliedsagent ist also nicht gezwungen, sich an die Regeln zu halten. Hält er sich nicht an die Regeln, so liegt im technischen Sinne eine Typverletzung vor, die beispielsweise mit der Aufkündigung der Mitgliedschaft durch den Positionsagenten geahndet werden kann.

Im allgemeinen ist der Positionagent für eine geeignete Fehlerbehandlung im Sinne einer Ausnahmebehandlung (execption handling) zuständig. Ein Beispielprotokoll zur Kontrolle zeigt die Abbildung 13.9. Im Idealfall werden die Nachrichten einfach weitergeleitet. Nur im Fehlerfall tritt eine Ausnahmebehandlung ein, die hier auch den Mitgliedsagenten einbezieht.

[3] Pointiert formuliert kann man sagen, dass sich ein Organisationsmitglied stets konform mit den Rollenerwartungen, da per Definition nur dann ein Organisationsmitglied ist, wenn er sich an die an ihn gestellten Anforderungen hält.

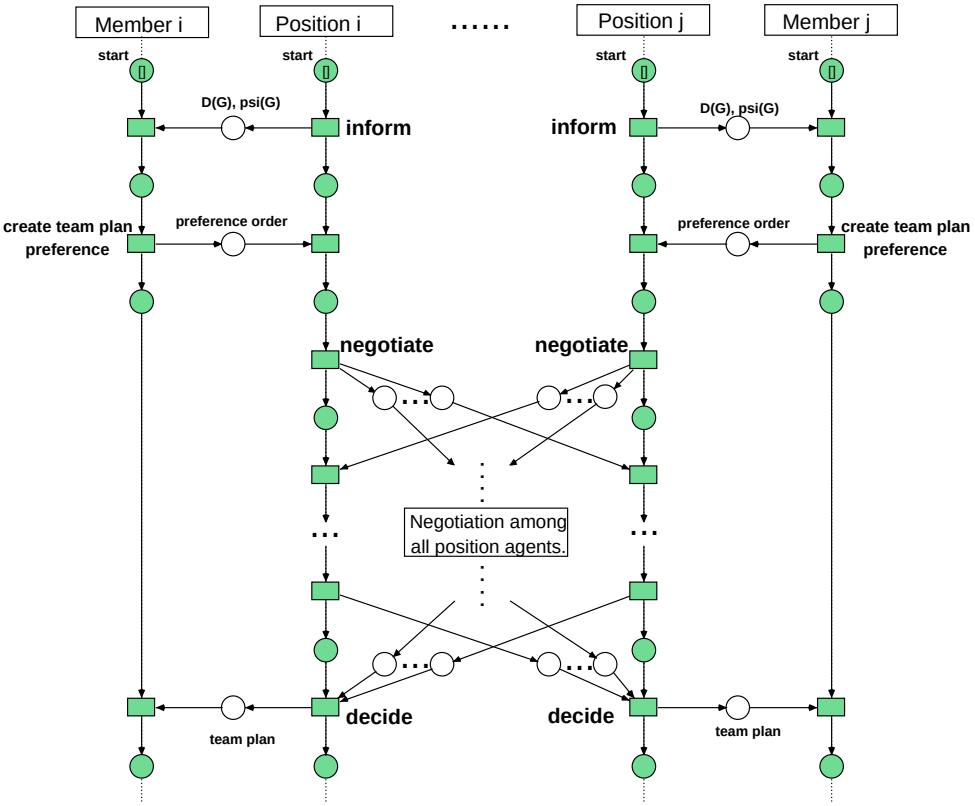


Abbildung 13.8: Protokoll zur Teamplanung

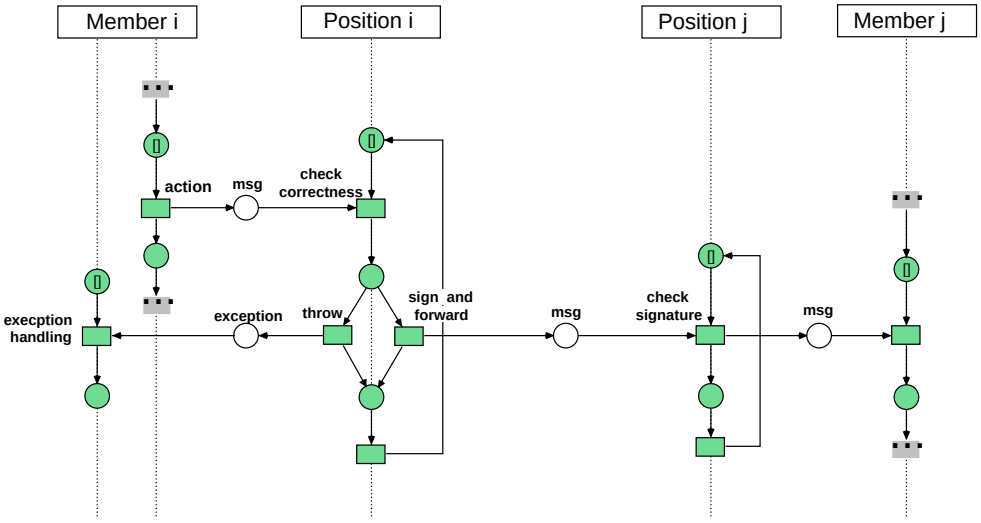


Abbildung 13.9: Protokoll zur Ausführungskontrolle

13.4 Ausprägung organisationaler Strukturen

Wie wir gesehen haben, besitzt Teamwork mit den drei Teilaspekten der Teamformation, der Teamplanung und der Ausführungskontrolle eine universelle, von den konkreten Aufgaben unabhängige Struktur. Wie wir gesehen haben, lässt dies aber dennoch großen Raum für die Implementation der Position/Mitglied-Interaktion.

Varianten zur Operationalisierung der Teamformation betreffen den Zwang für das Position/Mitglied-Paar, delegierte Aufgaben anzunehmen:

1. Jeder Positionsagent muss jede an ihn delegierte Teilaufgabe bearbeiten.

2. Jeder Positionsagent wird gefragt, ob er bereit ist, eine Teilaufgabe zu bearbeiten. Der delegierende Agent ist aber an eine Ablehnung nicht gebunden.

3. Ein Positionsagent darf sogar die an ihn delegierte Teilaufgabe ablehnen, vorrausgesetzt, dass die Bearbeitung durch einen anderen Agenten garantiert ist.

Varianten zur Operationalisierung der Teamplanung betreffen die Verbindlichkeit der Entscheidung einzelner Agenten für andere bei der Teamplanfindung. Allgemein gilt, dass die Positionsagenten einen Teamplan als Kompromiss aushandeln.

1. Manche Positionsagenten können Vorentscheidungen treffen, die für andere Positionsagenten im folgenden Verhandlungsprozess bindend sind. Diese Möglichkeit zur machtbesetzten, autoritären Planung ergibt sich anhand der Organisationsstruktur und ist unabhängig vom aktuellen Team.

2. Positionsagenten können für andere Positionsagenten bindende Vorentscheidungen treffen. Diese Autorität ergibt sich aber anhand der Teamstruktur, d.h. dass Positionen nur jenen Vorschriften machen können, die ihnen in der Baumstruktur des Teamnetzes untergeordnet sind.

3. Alle Positionsagenten nehmen gleichberechtigt am Verhandlungsprozess teil. Die Entscheidung wird gemeinschaftlich getroffen.

Die Mitgliedsagenten sind indirekt durch ihren Positionsagenten an der Verhandlung beteiligt. Inwieweit dieser an die Vorlieben des Mitglieds gebunden ist, generiert eine weitere Dimension, die hier aber nicht weiter zur Klassifikation herangezogen werden soll.

Beide Aspekte – Teamformation und -planung – stellen unabhängige Dimensionen der Teamprozesse und damit auch der Organisiertheit dar.

Es ergibt sich somit das zweidimensionale Schema aus Abbildung 13.10 zur Klassifikation von Teamprozessen. Jeder Teamprozess besitzt im Prinzip die gleichen Grundstruktur, bestehend aus Formation, Planung und Durchführung. Die jeweilige Ausprägung in Gestalt der oben beschriebenen Operationalisierungen unterscheiden die Prozesse des Teamworks jedoch charakteristisch.

Planung / Formation	autoritär	teamautoritär	egalitär
Positionen müssen Aufgaben annehmen.	Hierarchien		
Positionen bewerten Aufgaben.		Föderationen	
Positionen können Aufgaben ablehnen.			Märkte

Abbildung 13.10: Organisationales Klassifikationsschema

In (Köhler und Wester-Ebbinghaus, 2007a,b) wurden drei typische Formen dieser Formation/Teamplanung-Interaktion identifiziert: Betriebe als Idealform hierarchischer, autoritärer Teamprozesse, virtuelle Organisationen (auch: Föderationen) als Idealform kongregierter und kooperierender Teamprozesse und Märkte als Idealform egalitärer, verhandelnder Teamprozesse. Diese Formen bilden die Hauptdiagonalelemente in der Klassifikationsmatrix aus Tabelle 13.10.

13.5 Vergleich von Sonar mit anderen agenten- und organisationsorientierten Ansätzen

Betrachten wir die Beziehungen der SONAR-Konzepte, wie sie in Abbildung 13.11 dargestellt sind, so stellen wir fest, dass sie in unterschiedlichen Graden auch in anderen agenten- und organisationsorientierten Ansätzen präsent sind.

So kommen Taxonomien (auch: Ontologien), Rollen und Dienstnetze in Form von Interaktionsprotokollen in nahezu allen agentenorientierten Ansätzen vor, was sich schlicht aus den grundlegenden Agentenkonzepten herleitet, hier speziell die Interaktivität (vgl. dazu auch den Abschnitt 3). Aber auch in Komponenten-orientierten Ansätzen oder dem Semantic Web spielen diese Konzepte eine zentrale Rolle.

Delegationsnetze – und speziell hier die Teamnetze – beschreiben die Struktur von Interaktionsnetzwerken. Im Gegensatz zu den Interaktionsprotokollen wird hier nicht beschrieben, wie Agenten miteinander interagieren, sondern welche Agenten dies tun. Delegationsnetze gehen somit den Interaktionsprotokollen logisch vor, da jede Interaktion im Rahmen eines Delegationsnetzes stattfindet. Teamnetze sind eng mit den TMST-Bäumen (engl. task/method/sub-task trees) (siehe dazu Cuena und Ossowski, 1999) verwandt. Allgemeiner betrachtet stellen Delegations- und Teamnetze ein Muster für verteilte Teile-und-Herrsche Algorithmen dem Vorbild des *Contract-Net* Protokolls (Smith, 1977) dar.

Eine Besonderheit unseres Ansatzes ist die Betrachtung der Steuerung von Dienstnetzen, die sich aus der Modellierung in Form von Petrinetzen ergibt. Unsere formalen Spezifikationen der Interaktionen besitzen eine inhaltliche Nähe zu den Workflow-Petrinetzen, so dass wir untersuchen können, ob durch eine

Steuerung des Schaltverhaltens Eigenschaften wie Termination und Fortsetzbarkeit zu garantieren sind (vgl. Abschnitt 9).

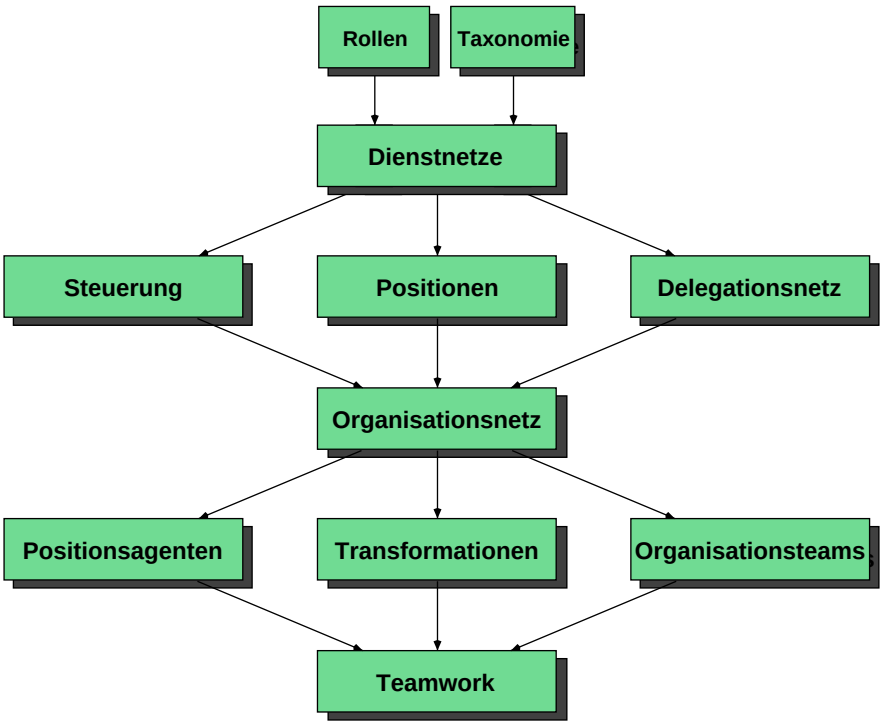


Abbildung 13.11: Beziehungen der SONAR-Konzepte

Positionen bilden eine Abstraktionsebene zwischen den Agenten und den ihn zugewiesenen Rollen. Das Konzept der Position leitet sich aus der Organisationstheorie ab (vgl. dazu Abschnitt 5.4)nd findet sich dementsprechend nur in den organisationsorientierten Ansätzen zur Software-Entwicklung, wie beispielsweise MASE (DeLoach u. a., 2001), GAIA (Zambonelli u. a., 2003), TROPOS (Bresciani u. a., 2004), OMNI (Dignum u. a., 2004), MOISE (Boissier u. a., 2000) und ODML (Horling und Lesser, 2005b).

Die SONAR-Organisationsnetze stehen im Zentrum eines SONAR-Multiagentensystems, und dies sowohl in der Design- als auch in der Implementationsphase. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass sich in der Vielzahl der organisationsorientierten Ansätzen die Betrachtung von Organisationen auf die Designphase beschränkt. Zur Designzeit wird ein Organisationsnetz hauptsächlich auf die Wohlgeformtheit hin analysiert. Für die Implementation wird aus der Organisation ein Netzwerk von Positionsagenten erzeugt, wobei durch das Organisationsnetz bereits auch die relevanten Prozesse wie die Teamformation, die habituellen Präferenzen usw. festgelegt sind. Dieses Netzwerk beschreibt den formalen Anteil der Organisation. Die gesamte Organisation ergibt sich in SONAR als eine Kopplung von Positions- und Mitgliedsagenten. Ein SONAR-Agentensystem entsteht also als Interaktion von Organisation und Mitgliedern (vgl. dazu Abschnitt 13). Das gesammte Teamwork leitet sich also in SONAR von

der Organisation ab. Für einen Vergleich von SONAR mit anderen Infrastrukturen für Agentenorganisationen wie ISLANDER oder S-MOISE siehe (Köhler-Bußmeier u. a., 2008).

Eine weitere Besonderheit der SONAR-Organisationsnetze ist ihre Eigenschaft, dass sich die Teamnetze, die für die konkrete Interaktion benötigt werden, direkt aus dem Organisationsnetz abgeleitet werden können. Dies ergibt sich aus der Anwendung der Prozesstheorie der Petrinetze, denn nach Theorem 11.8 ist jeder Prozess eines Organisationsnetzes ein Teamnetz.

Solche Teamnetze werden aber nicht nur eingesetzt, um eine „normale“ Interaktion zu rahmen, sondern auch, um die Organisation als solche zu transformieren. In Kapitel 12 haben wir betrachtet, wie es möglich ist, organisationelle Transformationen durch Anpassungsprozesse der Positionsagenten zu realisieren. Diese Anpassung findet in SONAR-Multiagentensystemen koordiniert in sogenannten Transformationsteams statt. Hier zeigt sich sehr deutlich, dass die gesamte Information über die Organisation durch die Positionsagenten repräsentiert wird. SONAR besitzt also – und dies ist eine Besonderheit – ein grundlegendes Konzept für das verteilte organisationale Lernen.

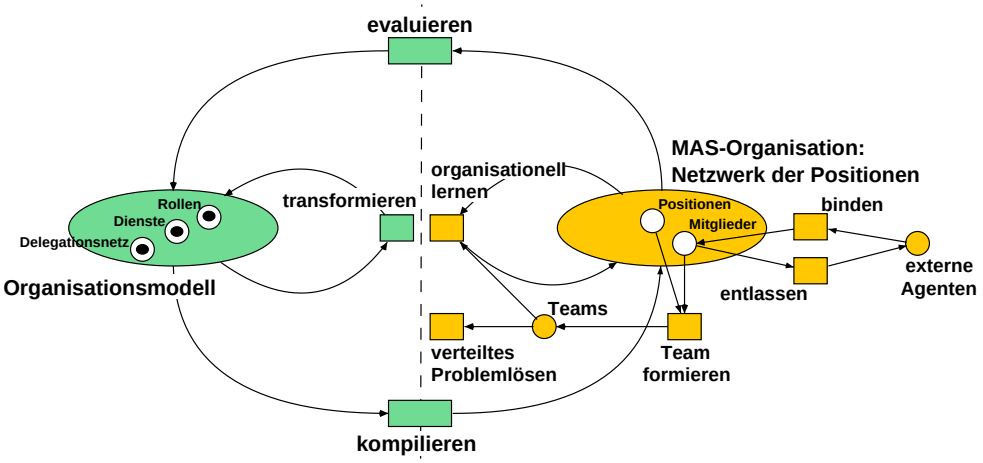


Abbildung 13.12: Das SONAR-Entwicklungsmodell

Der durch SONAR beschriebene Ansatz zur agentenorientierten Softwareentwicklung kann mit der abstrakten Beschreibung iterativer Entwicklungsmodelle in Abbildung 3.10 verglichen werden. Abbildung 13.12 stellt die SONAR-Konzepte und ihre Abhängigkeiten in einer Form dar, die sich an die Darstellung der Abbildung 3.10 anlehnt. Man erkennt sofort, dass sich das SONAR-Entwicklungsmodell in das Schema einfügt und es in Hinblick auf die grundlegenden Systemaktivitäten: Teamformation, verteiltes Problemlösen und organisationelles Lernen verfeinert.

Zusammenfassung

In diesem Abschnitt haben wir gezeigt, dass sich Agentensysteme geeignet als Interaktion von formaler Organisation und ihren Mitgliedern darstellen las-

sen. Dies erweitert die bisherige Darstellung der formalen Organisation um den Aspekt, dass es die Organisationsmitglieder sind, welche die organisationalen Prozesse ausführen und mit Leben füllen. Die Teamprozesse werden also nicht ausschließlich von den Positionen erbracht, sondern vielmehr von dem aus Position und Organisationsmitglied bestehenden Paar. Dieses Paar besteht dabei gleichermaßen aus zwei analytisch trennbaren Komponenten, obgleich praktisch keine der beiden Komponenten jemals allein auftreten würde. Daher sind in die Teamprozesse der Formation, der Planung und der Planausführung stets Positionen und Mitglieder involviert, mit der Besonderheit, dass Mitglieder ausschließlich durch ihre jeweiligen Positionen wirksam werden können. Letzteres drückt sich insbesondere in den Interaktionsprotokollen der Teamprozesse aus. Außerdem zeigt sich, dass die konkreten Ausprägungen der Teamformation und -planung ein hinreichend reiches Spektrum organisationaler Strukturen aufspannt, um darin die aus der Organisationstheorie bekannten Strukturen der Hierarchie, der Föderation oder des Marktes wiederzuerkennen. Es zeigt sich somit, dass das hier gezeigte Modell reich genug ist, um die bereits bekannten und praktisch erprobten Organisationsformen direkt zu modellieren.

14 Zusammenfassung und Ausblick

Wir wollen die in dieser Arbeit betrachteten Aspekte der Selbstorganisation in Form von übergreifenden Szenarien zusammenfassen. Die aufeinander aufbauenden Szenarien behandeln reorganisierende Wechselwirkungsaspekte, die auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen angesiedelt sind (vgl. dazu Abbildung 14.1). Die Szenarien reichen von der individuellen, interaktionsorientierten Perspektive eines Akteurs bis hin zu organisationalen Perspektive. Wir beschreiben zunächst die Details dieser Szenarien und zeigen dann, wie diese sich in ihrer jeweiligen Erscheinungsform in all den Abschnitten dieser Arbeit widerspiegeln.

Internalisierung von Handlungsregeln. Agenten sind adaptive, lernfähige Einheiten, die sich an ein Umfeld anpassen können. Dazu ist es notwendig, interne Strukturen in Form von Handlungsweisen und -regeln auszubilden, die den Handlungsraum eines Agenten konstituieren. Diese Strukturen begrenzen den Planungsprozess und entlasten ihn dadurch. Den Vorgang der Anpassung durch Übernahme von Handlungsregeln in routinierte Basisstrukturen bezeichnen wir als Internalisierung.

Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Modellierung solcher Mechanismen zu legen, die wirksam werden, *ohne* dass sich die Akteure dessen *bewusst* wären. Mit anderen Worten: Es sind sub-rationale Mechanismen zu implementieren. An dieser Stelle ergibt sich die Möglichkeit, die Beziehung von Außen- und Selbststeuerung zu analysieren, d.h. die sub-rationalen Mechanismen, deren Erzeugung und deren Logik den Akteuren verborgen bleibt, können mit explizit wirkenden Mechanismen der VKI kontrastiert werden. Bei solchen expliziten Mechanismen handelt es sich beispielsweise um Ziele und Intentionen, die im Agenten auf der expliziten, d.h. logischen Ebene abgehandelt werden.

Interdependenzbewältigung. Ein Agent handelt rational, doch anders als für Planungsprozesse der KI ist in der VKI die Planung eines Agenten einerseits durch die ihm zur Verfügung stehenden Handlungsmöglichkeiten und andererseits durch die Handlungen anderer Agenten eingeschränkt. Oder anders formuliert: Agenten sind sowohl durch ihre begrenzten Fähigkeiten als auch durch ihre soziale Einbettung eingeschränkt.

Handlungen eines Agenten müssen in das soziale Umfeld integriert werden. Diese Integration ist insofern notwendig, da die Handlungsweisen im allgemeinen auf die Duldung oder sogar auf die Unterstützung der anderen Agenten angewiesen sind. Diese Beziehungen werden als soziale Interdependenzen bezeichnet. Sie haben im allgemeinen großen Einfluss auf die Handlungsmöglichkeiten, also auch auf den Planungsraum. Die elementarste Möglichkeit, soziale Abhängigkeiten zu berücksichtigen, besteht darin, sie von Anfang an in die Planung mit einzubeziehen. Dieser Ansatz ist insofern sehr erfolgsversprechend, als dass er

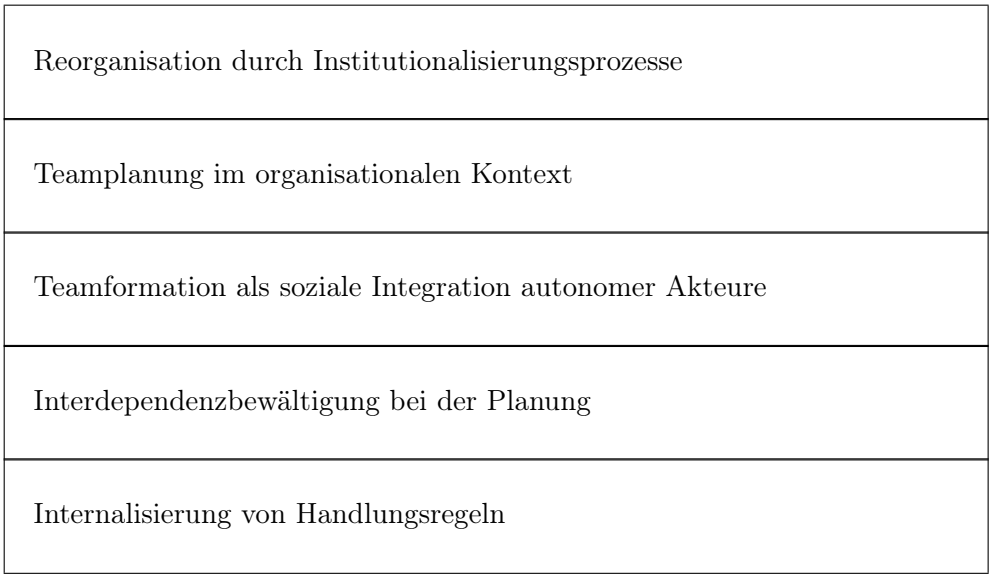


Abbildung 14.1: Aktivitätsebenen in Multiagentensystemen

für einen reibungslosen Ablauf sorgt, indem Konflikte bei der Planausführung vermieden werden.

Teamformation als soziale Integration. Nicht immer ist es möglich, soziale Interdependenzen bereits in der Planungsphase zu vermeiden, sei es, weil nicht alle sozialen Randbedingungen bekannt sind oder weil bereits die Berücksichtigung aller bekannten Randbedingungen dem Agenten keinerlei Handlungsoptionen ließe. Die Interdependenzbewältigung kann dann nicht mehr rein intern erfolgen, indem sich jeder Agent passiv an der sozialen Umwelt orientiert und auch an an ihr ausrichtet. Vielmehr ist es notwendig, die jeweiligen Pläne nachträglich durch *Verhandlungen* mit den sozialen Beziehungen in Einklang zu bringen. Die Agenten besitzen also neben der passiven Form der Anpassung auch noch die Möglichkeit der aktiven Gestaltung, indem sie miteinander in einen Verhandlungsprozess eintreten. Dieser Prozess, der zur Bildung eines Koordinierungsplans führt, wird als überindividuelles Konstrukt ebenfalls der Organisation zugeordnet und zwar derjenigen, in dessen Bezugsrahmen sich der Koordinierungsprozess abspielt.

Planen im organisationalen Kontext. Ein Koordinierungsprozess muss nicht bottom-up, d.h. durch die Agenten selbst initiiert sein. Er kann auch von der Organisation vorgeschrieben werden, beispielsweise in Form von normativen Erwartungsstrukturen. Diese normativen Erwartungsstrukturen bilden einen intersubjektiven, die Agenten überspannenden Interaktionszusammenhang. Elementare Aufgabe aus Sicht des Interaktionszusammenhangs ist es, die Agenten in einen verteilten Planungsrahmen zu integrieren. Dazu kann auf schematische Koordinierungsstrukturen, d.h. auf soziale Protokolle, zurückgegriffen werden,

die bei der Instantiierung an die zur Verfügung stehenden Agenten angepasst werden müssen.

Reorganisation durch Institutionalisierungsprozesse. Bewährte verteilte Pläne sollten nicht stets wiederholt generiert werden, sondern sollten besser bereits als routinisierte Prozeduren institutionalisiert sein. Diese Formen des etablierten Ablaufes bezeichnen wir als Organisationsregeln, die sowohl Koordinierungsstrukturen, Rollen, Position etc. umfassen. Institutionalisierungsprozesse sind Ausdruck des organisationalen Lernens. Institutionalisierungsprozesse definieren neue Organisationsregeln oder modifizieren bestehende, wodurch sich das System reorganisiert – und das autopoietisch, d.h. aus sich selbst heraus. Es handelt sich bei der Reorganisation somit um eine Selbstorganisation.

Zusammenfassung

Die soeben in Form von Szenarien geschilderten Aspekte der Selbstorganisation finden wir in den vier Abschnitten dieser Arbeit jeweils in spezieller Ausprägungen wieder.

Wir stellen zunächst fest, dass die Szenarien die in Kapitel 3 behandelten Aspekte der Koordination aufgreifen: Wir haben in Abschnitt 3.2 die Koordination in Form von Kooperation und Konkurrenz behandelt – beides elementare Formen der Interdependenzbewältigung. Abschnitt 3.3 behandelt normative Agenten und Institutionen – entsprechend der Teamformation. Abschnitt 3.4 behandelt Multiagentensystemorganisationen, was dem Szenario der Planung im organisationalen Kontext entspricht. Abschnitt 3.5 hatte soziale Theorien der Agentensysteme zum Gegenstand, bei denen Institutionen das Objekt sozialer Prozesse sind – passend zum Szenario der Reorganisation durch Institutionalisierungsprozesse.

Auch in der Modellierung soziologischer Theorien tauchten die Szenarien unmittelbar auf. Aspekte der Interdependenzbewältigung fanden sich bei allen Theorien, insbesondere natürlich bei den Akteursmodellen in Abschnitt 5.2. Die Teamformation, als soziale Integration autonomer Akteure, wird in Abschnitt 5.3 bei der Betrachtung von Strukturdynamiken thematisiert, aber auch bei den Kontrollmechanismen der Gesellschaftstheorien in Abschnitt 6. Teamplanung, verstanden auch als Planen im institutionalisierten oder organisationalen Kontext, findet sich offensichtlich in Abschnitt 5.4 bei der Behandlung von Organisationen als Formen strukturierter Handlungsfelder, hier speziell im strategischen Ansatz von Crozier und Friedberg. In allgemeiner Form äußert er sich in Abschnitt 6 auch als Kontrollmechanismus bei Elias, als Offizialisierungsprozess bei Bourdieu und als Ordnungsprozess bei Popitz. Die Internalisierung von Handlungsregeln fanden wir im Über-Ich bei Elias, im Habitus bei Bourdieu und auch in Form von Verhaltensregelmäßigkeiten bei Popitz. Besonders offensichtlich ist der Stellenwert des Szenarios der Reorganisation durch Institutionalisierungsprozesse: Dies ist genau die Essenz der Mikro/Makro-Wechselwirkungen aus Abschnitt 6.

Da das Mikro/Makro-Modell als Verallgemeinerung der im ASKO-Projekt modellierten Sozialtheorien konzipiert wurde, ist es nicht verwunderlich, dass wir auch auf dieser Ebenen eine Korrespondenz zu den Szenarien vorfinden. Das Mikro/Makro-Modell beschreibt die Wechselwirkungen zwischen der Modellperspektive der Akteure, der sozialen Prozesse und der sozialen Struktur. Die Szenarien lassen sich direkt den Modellbestandteilen zuordnen: Die Internalisierung findet auf der Ebene des Akteurs statt. Die Interdependenzbewältigung vollzieht sich genau an der Schnittstelle zwischen Akteur und sozialen Prozessen. Die soziale Integration autonomer Akteure vollzieht sich im Handlungsgeflecht der sozialen Prozesse. Die Teamplanung im organisationalen Kontext beschreibt die Schnittstellenprozesse zwischen sozialen Prozessen und sozialer Struktur. Die Reorganisation durch Institutionalisierungsprozesse entspricht der Reproduktion auf der Ebene der sozialen Struktur.

Die formale Darstellung des SONAR-Modells greift diese Szenarien, die zur Beschreibung von Selbstorganisation betrachtet wurden, ebenfalls wieder auf. Die Dienstnetze aus Kapitel 9 beschreiben die Interdependenzbewältigung in Form von Kooperationsprotokollen. Die Teamnetze aus Kapitel 10 stellen normative Institutionen dar, die Akteure in einen sozialen Kontext einbetten – entsprechend dem Szenario der sozialen Integration autonomer Akteure. Die Organisationsnetze aus Kapitel 11 stellen Strukturen bereit, innerhalb derer sich die Teamformation und die Teamplanung vollzieht, was direkt dem Szenario der Planung im organisationalen Kontext entspricht. Die Transformationsteams aus Kapitel 12 beschreiben, wie die Organisation auf sich selbst Bezug nimmt und sich selbstständig adaptiert – eine Form der Reorganisation durch Institutionalisierungsprozesse.

Diese Kapitel des formalen Abschnitts greifen diese Themen, die zur Beschreibung von Selbstorganisation betrachtet wurden, sowohl auf der Mikro- als auch der Makro-Ebene wieder auf. Die Darstellung des SONAR-Agenten in Kapitel 10 identifiziert für den Agenten folgende elementare Prozesse:

1. Routinehandlungen, Verhaltensregelmäßigkeiten
2. Handlungswahl als Planung im sozialen Kontext
3. Soziale Interaktion
4. Internalisieren von Routine
5. Interdependenzbewältigung

Gleichzeitig haben wir in Kapitel 11 gesehen, dass innerhalb einer Organisation die Positionsagenten zudem noch für intersubjektive Prozesse zuständig sind:

1. Teamformation auf Basis der Organisationsstruktur
2. Verteilte Teamplanung im Kontext von Institutionen
3. Kontrolle der Planausführung

4. Teamtransformationen als organisationale Institutionalisierungsprozesse

5. Organisationales Lernen als Anpassung der Teamplanungspräferenzen

Wir können an dieser Zusammenstellung erkennen, dass der SONAR-Agent die Szenarien nicht nur operationalisiert, sondern, dass der SONAR-Agent gleichermaßen auf der Mikro- wie auch auf der Makro-Ebene anzusiedeln ist – wobei der Akzent sogar auf der Makro-Ebene liegt. Dies erkennen wir anhand der folgenden Korrespondenz von Feld-, Organisations- und Akteurskonzepten:

Feld	Organisation	Akteur
Institutionen	Teamformation	Routinehandlungen
Koordination	Teamplanung	Handlungswahl
soz. Konstellation	Planausführung	Interaktion
Institutionalisierung	Teamtransformationen	Internalisierung
Kapitalkämpfe	Präferenzanpassung	Interdependenzbewältigung

Diese Korrespondenz schließt damit an die Symmetrieüberlegungen aus Kapitel 8 an. Hier hatten wir festgestellt, dass die überindividuellen Tätigkeiten spiegelsymmetrisch zu den individuellen konzipiert sind (vgl. dazu speziell Abbildung 8.17). Dies unterstreicht deutlich die Verbindung des formalen SONAR-Modells zur sozialtheoretischen Konzeption der Entitätensysteme.

Die direkte Korrespondenz der Konzepte aus der VKI, der Soziologie bzw. der Sozionik und dem hier entwickelten formalen SONAR-Modell beweist, dass wir das Ziel unser Arbeit, ein formales Modell von Multiagentensystemen zu entwickeln, das in sozialwissenschaftlich befriedigender Weise die wechselseitige Bedingtheit zwischen Mikro- und Makrophänomenen berücksichtigt, erreicht haben. Es ist uns darüberhinaus im Rahmen der Theorie noch gelungen, aus dem formalen Modell praktische Konstruktionsanleitungen abzuleiten, so dass es möglich ist, ausgehend von einer konkreten Instanz des formalen Modells direkt ein Multiagentensystem als Prototyp zu generieren, womit SONAR einen Beitrag im Bereich der *modellgetriebenen Software-Architekturen* (engl. model driven architecture) darstellt.

Die Art und Weise, wie SONAR eine Verteilung der Organisation – nämlich als Netzwerk von Positionsagenten – realisiert, wie das formale Modell zur Erzeugung wohlgeformter Multiagentensysteme dient und wie diese Information auch noch zur Laufzeit zur Reorganisation eingesetzt werden, leistet einen Beitrag zu aktuell offenen Fragen der VKI. Hierbei verweise ich auf den Beitrag von Boissier u. a. (2007), der sich dezidiert mit der organisationsorientierten Software-Entwicklung auseinandersetzt. Die Autoren identifizieren im Ausblick ihrer Arbeit folgende fünf zukunfsweisende Forschungsaufgaben: (i) die dezentrale Implementierung von Organisationsmodellen, (ii) die Planung im organisationalen Kontext, (iii) der Entwurf von Modellierungssprachen für Organisationen, (iv) die Reorganisation von Organisationsmodellen und (v) die Hybridisierung

von menschlichen und künstlichen Akteuren.[1] Mit SONAR stelle ich einen Ansatz vor, der sich insbesondere mit den Punkten (i), (ii), (iii) und (iv) – Verteilung, Entwicklung und Reorganisation – konzeptionell auseinandersetzt, diese formal absichert, analysiert und der Softwaretechnik zugänglich macht.

Eine Besonderheit des Modells ist die unmittelbare Integration der Selbstorganisation als Teil der Systemfunktionalität. Dies war möglich, da wir die Selbstorganisation als reflexive Teamprozesse konzipiert haben. Damit zeigt sich sehr schön die Verschränkung von Struktur und Prozess – und dies auf allen Betrachtungsebenen (VKI, Sozionik, Theorie und Software-Entwicklung) dieser Arbeit, so wie es der Titel dieser Arbeit andeutet: *Koordinierte Selbstorganisation und selbstorganisierte Koordination.*

Ausblick

Zum Abschluss der Arbeit möchte ich einen Ausblick auf Anschlussarbeiten geben. Diese teilen sich in zwei Gruppen auf. Die Arbeiten der ersten Gruppe beschäftigen sich mit der praktischen Operationalisierung der SONAR-Architektur durch die Entwicklung einer „virtuellen Maschine“ für SONAR-Modelle. Die Arbeiten der zweiten Gruppe beschäftigen sich mit der Entwicklung und der Analyse der SONAR-Modelle. Zu beiden Punkten im einzelnen.

Operationalisierung der Sonar-Architektur Die Entwicklung einer virtuellen Maschinen zur Operationalisierung der SONAR-Architektur umfasst fünf Teilprojekte. Als erstes gilt es das Dienstnetzmodell umzusetzen. Hierbei bietet es sich an, zunächst nur solche Netze zu betrachten, die Workflownetze darstellen. Eine weitere formale, aber praktisch oftmals sinnvolle Beschränkung stellt die Teilklasse der 1-sicheren Netze dar, da für diese mit dem Werkzeug MCKIT (Schröter u. a., 2003) eine effiziente Analysealgorithmen existieren. Für eine Interoperabilität ist es zudem wichtig, dass die Datentypen auf Basis von Standards aus dem Bereich des Semantic-Web basieren, wie beispielsweise auf OWL. Für den strukturierten Entwurf ist es schließlich wünschenswert, algebraische Verknüpfungen (wie Parallelität, alternative Auswahl, Verfeinerung usw.) auf Dienstnetzen zu unterstützen.

Der zweite wichtige Punkt betrifft den SONAR-Agent selbst. Hier ist es wichtig, sich mit der Planungsarchitektur auseinanderzusetzen. Der Planer sollte mit der Prozessontologie, d.h. der Darstellung der Dienstnetze umgehen können. Auch sollten Konzepte aus dem Bereich der BDI-Logik – Wissen, Ziele und Pläne – einfließen, um abstrakt eine zielorientierte Aktivitätssteuerung programmieren zu können. Auch sollten Bewertungsfunktion in die Planungsarchitektur einfließen. Eine besonders hervorzuhebende Aufgabe des Planers besteht in der

[1] „Some challenges still need to be considered and solved. Among them, we can cite: (i) decentralization of the organization implementation architecture [...] is one important topic (ii) development and reasoning abilities in order to integrate top-down predefined organization [..] with bottom-up emergent organizations (iii) a better understanding of OMLs [organizational modeling languages] leading to organizational ontology standards to enable interoperation (iv) reorganization issues in general (how to evaluate? how to change?), and (v) building of mixed models for human and artificial agents working together.“

Steuerungssynthese, d.h. in der Aufgabe, zu einer gegebenen organisationalen Randbedingung ψ einen den Dienst steuernden Automaten zu berechnen.

Der dritte Punkt betrifft die Ausgestaltung der Positionsagenten. Positionsagenten sind spezielle SONAR-Agenten, die Datenstrukturen und Protokolle für die Teamaktivitäten generisch bereitstellen (vgl. dazu Kapitel 13). Es handelt sich dabei um das Protokoll der Teamformation, wie es in Abbildung 13.7 dargestellt wurde, um das Protokoll der Teamplanung, wie es in Abbildung 13.8 dargestellt wurde, und um das Protokoll der Planausführungskontrolle, wie es in Abbildung 13.9 dargestellt wurde. Diese Protokolle sind soweit zu verfeinern, dass sie als generische verteilte Algorithmen verwendbar sind.

Der vierte Punkt betrifft die Aufgaben des Organisationsagenten, der als logische Plattform für die Positionsagenten dient. Der Organisationsagent hat drei elementare Aufgaben, zu deren Erfüllung Datenstrukturen und Protokolle zu entwickeln sind. Es handelt sich erstens um die Initialisierung der Organisation, bei der eine formale Darstellung eines gegebenen SONAR-MAS (Org, Ag) verarbeitet wird, um die Initialisierungsinformation für alle Positionsagenten zu berechnen. Die zweite Aufgabe betrifft die Bindung von Mitgliedern an Positionen, wozu das Besetzungprotokoll aus Abbildung 13.6 umzusetzen ist. Hierbei muss der Organisationsagent insbesondere in der Lage sein, über die die Organisationsstrukturen Auskunft zu geben, so dass die Interaktionssprache über hinreichende Konstrukte erweitert werden muss. Die dritte Aufgabe des Organisationsagenten ist die Verwaltung der kryptographischen Schlüssel: Damit der Organisationsagenten als Key-Server agieren kann, ist ein geeignetes Protokoll zu entwerfen.

Der fünfte Punkt betrifft die automatisierte Teamverhandlung. Hier ist ein Algorithmus zu entwerfen, der ausgehend von den Bewertungen und Präferenzen aller Teamagenten zu einer verteilten Kompromissfindung führt. Als formale Basis bietet es sich dabei an, anstelle von Prozessen die Prozessentfaltung des Dienstnetzes, die analog zu den *partial global plans* auch Handlungsalternativen enthält, zu analysieren und hieraus einen bezüglich der Präferenzen optimalen Teilprozess zu berechnen – etwa einen Plan im Nash-Gleichgewicht.

Modellierung und Analyse von Organisationsmodellen Dieser Aufgabenbereich widmet sich den mit SONAR entwickelten Modellen. Dies betrifft erstens die Dienste. Für ein gegebenes Dienstnetz ist von Interesse, ob es sich um ein wohlgeformtes Workflownetz handelt. Ist dies nicht der Fall, so ist ein Algorithmus anzugeben, der entscheidet, ob es sich wenigstens um einen schwachkorrekten Dienst handelt. Umgekehrt ist es für die Entwicklung von Interesse, eine Subklassen zu identifizieren, deren Elemente strukturell bedingt schwachkorrekte Dienste sind. Ein Ansatz, Elemente dieser Klasse zu generieren, kann darin bestehen, von einem korrekten Dienst ausgehend und diesen sukzessive so zu verfeinern, dass die Eigenschaft der Korrektheit erhalten bleibt. Für die Planung ist es zudem noch relevant, die Prozessen eines Dienstnetzes zu bewerten, indem man jedem Prozess einen Nutzen zuweist, denn nur so wird der Nutzen einer organisationalen Steuerung bewertbar.

Das zweite Arbeitspaket betrifft den Aspekt der Steuerung von Dienstnetzen.

Wie wir gesehen haben, ist es möglich, jeden schwach-korrekten Dienst so zu steuern, dass er sich wie ein korrekter verhält. Die offene Frage ist nun, wie man eine solche Steuerung synthetisiert. Dabei ist nicht jede mögliche Steuerung auch gleichermaßen geeignet. Zum einen suchen wir solche Steuerungen, die minimal-restriktiv sind, d.h. Steuerungen, die möglichst nur die verbotenen Prozesse verhindern, aber fast alle erlaubten weiterhin zulassen. Zum anderen suchen wir aber auch nach solchen Steuerungen, deren Beschreibungsgröße minimal ist, damit sie sich leicht implementieren lassen. Schließlich ist der Aufwand der Steuerung zum Nutzen der erlaubten Prozesse zu setzen: Optimalerweise verbessert sich – verglichen mit dem ungesteuerten Fall – der mittlere Nutzen der Dienstnetzprozesse durch eine Steuerung, indem hauptsächlich wertvollere Prozesse erlaubt werden.

Drittens ist die Organisation selbst zu analysieren. Es ist zu entscheiden, ob die Organisation wohlgeformt ist (vgl. dazu Definition 11.11). Wir wollen zudem noch berechnen, ob alle von der Organisation generierten Teams wohlkoordiniert sind (vgl. dazu Definition 10.29). Für den Einsatz im konkreten Entwicklungseinsatz sind zudem noch weitere Organisationsmetriken zu identifizieren, die über die in dieser Arbeit vorgestellen hinausgehen, mit deren Hilfe sich bereits in frühen Entwicklungsphasen die Güte eines Organisationsmodells – in Hinblick auf seine Aufgabe – abschätzen lässt. Für den praktischen Einsatz ist es zudem wichtig, die derzeitige Definition der Organisationsnetze von P/T-Netzen auf gefärbte Netze zu erweitern, um so zu einer ausdrucksstärkeren Repräsentation zu gelangen. Wie wir bereits diskutiert haben, dienen Organisationen dazu, den Handlungsspielraum der Mitglieder zu rahmen, d.h. gezielt einzuschränken und bedingt durch die sich ergebende Komplexitätsreduktion ihre Planungsmöglichkeiten zu verbessern. Für ein gegebenes Organisationsmodell ist es daher wichtig zu entscheiden, ob die abgeleiteten Organisationsteams im Durchschnitt bezüglich des Nutzens „wertvollere“ Teamprozesse generieren und ob Organisationsteams tatsächlich die Planung erleichtern. Hier wird also die Verbesserung des Nutzens nicht wie im ersten Punkt auf einen Steuerung bezogen, sondern auf alle Steuerung, die von der Organisation erzeugt werden.

Das vierte Arbeitspaket widmet sich dem Deployment der Modelle im Rahmen der modellgetriebenen Software-Entwicklung. Wir suchen nach einem heuristischen Verfahren, ein Multiagentensystem zu generieren, welches bezüglich der Organisationsmetrik ein lokales Optimum darstellt. Dazu ist zu entscheiden, wie die Organisationsaktivitäten zu Positionen gruppiert werden. Es sind dann die Initialisierungsdaten für den Organisationsagenten aus dem Modell zu berechnen – inklusive der Initialisierungsinformationen aller Positionsagenten. Darunter fallen die Aufgaben einer Positionen, ihre implementierten Rollen, ihre privaten Schlüssel etc. – so wie es die Konstruktionsdefinition des Sonar-MAS (Org, Ag) nach Definition 11.23 nahelegt.

Und fünftens befassen wir uns im Rahmen der Reorganisation mit dem *organisationalen Lernen*. Hierzu ist im Detail zu klären, welche Veränderungen der Umwelt Reorganisationsprozesse nahelegen und wie die Planungspräferenzen δ und π der Positionsagenten anzupassen sind. Als Spezialfall des organisationalen Lernens wollen wir auch Transformationen des Organisationsmodells im Sinne von Kapitel 12 unterstützen. Dabei ist auch der Grad der Verbesserung

geeignet zu quantifizieren und mit den ebenfalls geeignet zu quantifizierenden Reorganisationskosten ins Verhältnis zu setzen. Wir gehen davon aus, dass hier insbesondere die Historie aller Kompromissfindungsprozesse, die im Rahmen der Teamplanung stattfinden, wertvolle Hinweise liefern und dass sich diese mit Techniken aus dem Bereich des Data- und Process-Mining ausgewertet werden sollten.

Mit dieser Betrachtung der Anschlussarbeiten endet unsere sozionische Analyse reflexiver Selbstorganisation. Und wenn wir eines aus der Betrachtung sozialer Prozesse gelernt haben, dann ist es die Erkenntnis, dass dieser Schluss nicht nur ein Ende, sondern gleichzeitig auch ein Anfang ist.

Literaturverzeichnis

[Aalst 1997] Aalst, Wil van d.: Verification of Workflow Nets. In: (Azeme und Balbo, 1997), S. 407–426

[Aalst 1998] Aalst, Wil van d.: The application of Petri nets to workflow management. In: *Journal of Circuits, Systems and Computers* 8 (1998), Nr. 1, S. 21–66

[Aalst 1999] Aalst, Wil van d.: Interorganizational Workflows: An Approach based on Message Sequence Charts and Petri Nets. In: *Systems Analysis - Modelling - Simulation* 34 (1999), Nr. 3, S. 335–367

[Adorno 1990] Adorno, Theodor W.: *Negative Dialektik*. Suhrkamp, 1990

[Alonso u. a. 2003] Alonso, Gustavo ; Casati, Fabio ; Kuno, Harumi ; Machiraju, Vijay: *Web Services*. Springer-Verlag, 2003

[Azeme und Balbo 1997] Azeme, Pierre (Hrsg.) ; Balbo, Gianfranco (Hrsg.): *Proceeding of the 18th International Conference on Application and Theory of Petri Nets*. Bd. *1248*. Springer-Verlag, 1997. (Lecture Notes in Computer Science)

[Baader u. a. 2003] Baader, F. (Hrsg.) ; Calvanese, D. (Hrsg.) ; McGuinness, D. (Hrsg.) ; Nardi, D. (Hrsg.) ; Patel-Schneider, P.F. (Hrsg.): *Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*. Cambridge University Press, 2003

[Baeten 1990] Baeten, J. C. M. (Hrsg.): *Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science*. Bd. 17: *Applications of Proces Algebra*. Cambridge University Press, 1990

[Barendregt 1992] Barendregt, Henk: Lambda Calculi with Types. In: *Handbook of Logic in Computer Science* Bd. 2. Oxford university press, 1992

[Barendregt 1985] Barendregt, Henk P.: *The Lambda Calculus. Its Syntax and Semantics*. Elsevier Science Publishers B.V., 1985 (Studies in Logic and the Foundations of Mathematics)

[Barringer u. a. 1990] Barringer, H. ; Fisher, M. ; Gabbay, D. ; Gough, G. ; Owens, R.: METATEM: a framework for programming in temporal logic. In: *REX workshop: Proceedings on Stepwise refinement of distributed systems: models, formalisms, correctness*. New York, NY, USA : Springer-Verlag New York, Inc., 1990, S. 94–129. – ISBN 0-387-52559-9

[Bellifemine u. a. 2001] Bellifemine, Fabio ; Poggi, Agostino ; Rimassa, Giovanni: Developing multi-agent systems with JADE. In: Castelfranchi, Cristiano (Hrsg.) ; Lespérance, Yves (Hrsg.): *Seventh International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-2000)* Bd. 1986, Springer-Verlag, 2001, S. 89–103

[Berger und Luckmann 1997] Berger, Pewter ; Luckmann, Thomas: *Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit*. Fischer Verlag, 1997

[Best und Fernández 1988] Best, Eike ; Fernández, César: *Nonsequential processes: a Petri net view*. Springer-Verlag, 1988

[Best und Merceron 1984] Best, Eike ; Merceron, Agathe: Frozen tokens and d-continuity: a study in relating system properties to process properties. In: Rozenberg, G. (Hrsg.): *Advances in Petri Nets* Bd. 188. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1984, S. 48–61

[Billington u. a. 1998] Billington, J. ; Du, B.B. ; Farrington, M.: Modelling and Analysis of Multi-Agent Communication Protocols using CP-nets. In: *Engineering Mathematics and Applications (EMAC'98)*, Juli 1998, S. 119–122

[Blumer 1973] Blumer, Herbert: Der methodologische Standort des Symbolischen Interaktionismus. In: Soziologen, AG B. (Hrsg.): *Alltagswissen, Interaktion und gesellschaftliche Wirklichkeit. Band 1: Symbolischer Interaktionismus und Ethnomethodologie.* Rowohlt, 1973, S. 80–146

[Boissier u. a. 2000] Boissier, Olivier ; Hannoun, Mahdi ; Sichman, Jaime S. ; Sayettat, Claudette: MOISE: An Organizational Model for Multi-agent Systems. In: *IBERAMIA-SBIA '00: Proceedings of the International Joint Conference, 7th Ibero-American Conference on AI*, Springer-Verlag, 2000, S. 156–165

[Boissier u. a. 2007] Boissier, Olivier ; Hübner, Jomi F. ; Sichman, Jaime S.: Organization Oriented Programming: From Closed to Open Organizations. In: O'Hare, Gregory M. P. (Hrsg.) ; Ricci, Alessandro (Hrsg.) ; O'Grady, Michael J. (Hrsg.) ; Dikenelli, Oguz (Hrsg.): *Engineering Societies in the Agents World (ESAW 2006)* Bd. 4457, Springer-Verlag, 2007, S. 86–105

[Boissier u. a. 2005] Boissier, Olivier ; Sichman, Jaime S. ; Reis Coutinho, Luciano dos: Modeling organization in MAS: a comparison of models. In: Choren, R. (Hrsg.) ; Silva, V. (Hrsg.): *Proc. of the 1st. Workshop on Software Engineering for Agent-Oriented Systems (SEAS'05)*, 2005

[Booch 1992] Booch, Grady: *Object-oriented analysis and design: with applications.* Benjamin/Cummings, 1992

[Bordini u. a. 2007] Bordini, Rafael H. ; Hübner, Jomi F. ; Wooldridge, Michael: *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason.* Wiley, 2007

[Bosetzky 1992] Bosetzky, Horst: Mikropolitik, Machiavellismus und Machtkumulation. In: Küpper, W. (Hrsg.) ; Ortmann, G. (Hrsg.): *Mikropolitik. Rationalität, Macht und Spiele in Organisationen.* Opladen (Westdeutscher Verlag), 1992. – 2. Auflage

[Bouhoula u. a. 2000] Bouhoula, Adel ; Jouannaud, Jean-Pierre ; Meseguer, José: Specification and Proof in Membership Equational Logic. In: *Theoretical Computer Science* 236 (2000), S. 35–132

[Bourdieu 1987] Bourdieu, Pierre: *Die feinen Unterschiede.* Suhrkamp, 1987

[Bourdieu 1993] Bourdieu, Pierre: *Sozialer Sinn.* Suhrkamp, 1993

[Bourdieu 1998] Bourdieu, Pierre: *Praktische Vernunft.* Suhrkamp, 1998

[Bradfield 1992] Bradfield, Julian C.: *Verifying temporal properties of systems.* Birkhäuser, 1992

[Bratman 1987] Bratman, M. E.: *Intentions, Plans, and Practical Reason.* Cambridge : Harvard University Press, 1987

[Bresciani u. a. 2004] Bresciani, P. ; Giorgini, P. ; Giunchiglia, F. ; Mylopoulos, J. ; Perini, A.: Tropos: An Agent-Oriented Software Development Methodology. In: *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 8 (2004), S. 203–236

[Brooks 1990] Brooks, Rodney A.: A robust layered control system for a mobile robot. (1990), S. 2–27

[Bruni u. a. 1998] Bruni, Roberto ; Meseguer, José ; Montanari, Ugo ; Sassone, Vladimiro: A Comparison of Petri Net Semantics under the Collective Token Philosophy / Basic Research in Compuer Science. 1998 (17). – Forschungsbericht

[Bruni u. a. 1999] Bruni, Roberto ; Meseguer, José ; Montanari, Ugo ; Sassone, Vladimiro: Functorial Semantics for Petri Nets under the Individual Token Philosophy. In: *Electronic Notes in Theoretical Computer Science: Proceedings of CTCS'99, 8th conference on Category Theory and Computer Science* Bd. 29, Elsevier Science, 1999, S. 1–19

[Cabac u. a. 2003] Cabac, Lawrence ; Moldt, Daniel ; Rölke, Heiko: A Proposal for Structuring Petri Net-Based Agent Interaction Protocols. In: Aalst, W. v. d. (Hrsg.) ; Best, E. (Hrsg.): *International Conference on Application and Theory of Petri Nets 2003* Bd. 2679, Springer-Verlag, 2003, S. 102–120

[Camic 1986] Camic, Charles: The Matter of Habbit. In: *American Journal of Sociology* 91 (1986), S. 1039–1087

[Carley und Gasser 1999] Carley, Kathleen M. ; Gasser, Les: Computational organisation theory. In: (Weiß, 1999), S. 229–330

[Carriero und Gelernter 1989] Carriero, N. ; Gelernter, D.: Linda in context. In: *Communications of the ACM* 32 (1989), S. 444–458

[Castelfranchi u. a. 1999] Castelfranchi, C. ; Dignum, F. ; Jonker, C. ; Treur, J.: Deliberate Normative Agents: Principles and Architecture. In: *Proceedings of the Sixth International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL 99)*, 1999

[Castelfranchi 1995] Castelfranchi, Christiano: Commitments: from individual intentions to groups and organisations. In: *First International Conference on Multi Agent Systems*, AAAI Press and MIT Press, 1995, S. 41–48

[Castelfranchi 2000] Castelfranchi, Christiano: Engineering social order. In: Omicini, A. (Hrsg.) ; Tolksdorf, R. (Hrsg.) ; Zambonelli, F. (Hrsg.): *Engineering Societies in the Agents World. First International Workshop, ESAW 2000, Berlin, Germany* Bd. 1972, Springer-Verlag, 2000, S. 1–18

[Castelfranchi und Conte 1995a] Castelfranchi, Christiano ; Conte, Rosaria: *Cognitive and Social Action*. UCL Press, 1995

[Castelfranchi und Conte 1995b] Castelfranchi, Christiano ; Conte, Rosaria: Understanding the Functions of Norms in Social Groups Through Simulation. In: Gilbert, N. (Hrsg.) ; Conte, R. (Hrsg.): *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*. UCL Press: London, 1995, S. 252–267

[Castelfranchi und Conte 1996] Castelfranchi, Christiano ; Conte, Rosaria: Distributed artificial intelligence and social science: Critical issues. In: O'Hare, G. M. P. (Hrsg.) ; Jennings, N. R. (Hrsg.): *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, Wiley, 1996, S. 527–542

[Castelfranchi und Conte 1995c] Castelfranchi, Cristiano ; Conte, Rosaria: Norms as Mental Objects - From Normative Beliefs to Normative Goals. In: *5th European Workshop on Modelling Autonomous Agents (MAAMAW '93)* Bd. 957, Springer, 1995, S. 186–196

[Castelfranchi und Conte 1999] Castelfranchi, Cristiano ; Conte, Rosaria: From Conventions to Prescriptions – Towards an Integrated View of Norms. In: *Artificial Intelligence and Law* 7 (1999), Nr. 4, S. 323–340

[Chainbi u. a. 1996] Chainbi, W. ; Hanachi, C. ; Sibertin-Blanc, C.: The Multi-agent Prey/Predator problem: A Petri net solution. In: Borne, P. (Hrsg.) ; Gentina, J.C. (Hrsg.) ; Craye, E. (Hrsg.) ; Khattabi, S., El (Hrsg.): *Proceedings of the Conference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA'96)*, IEEE Society Press, 1996, S. 291–299

[Chandy und Misra 1989] Chandy, Mani ; Misra, Jayadev: *Parallel programm design: a foundation.* Adison-Wesley, 1989

[Clarke u. a. 1989] Clarke, Edmund M. C. ; Long, David E. ; McMillan, Keneth L.: Compositional Model Checking. In: *Proc LICS'89*, IEEE Computer Society Press, 1989, S. 353–363

[Cohen u. a. 1972] Cohen, Michael D. ; March, James G. ; Olsen, Johan P.: A Garbage Can Model of Organizational Choice. In: *Administrative Science Quarterly* 17 (1972), S. 1–25

[Cohen und Levesque 1991] Cohen, Phil R. ; Levesque, Hector J.: Teamwork. In: *Nous, Special Issue on Cognitive Science and Artifical Intelligence* 25 (1991), Nr. 4, S. 487–512

[Coleman 1991] Coleman, James S.: *Metatheorie: Die Erklärung in der Sozialwissenschaft.* S. 1–29. In: *Grundlagen der Sozialtheorie.* München : Oldenbourg, 1991

[Collins 2000] Collins, Randall: Über die mikrosozialen Grundlagen der Makrotheorie. In: Müller, Hans-Peter (Hrsg.) ; Sigmund, Steffen (Hrsg.): *Zeitgenössische amerikanische Soziologie.* Leske und Budrich, 2000, S. 99–134

[Conte u. a. 1998] Conte, Rosaria ; Gilbert, Nigel ; Sichman, Jaime S.: MAS and Social Simulation: A Suitable Commitment. In: Sichman, J.S. (Hrsg.) ; Conte, R. (Hrsg.) ; Gilbert, N. (Hrsg.): *Proc. 1st. International Workshop on Multi-Agent Based Simulation (MABS'98)* Bd. 1534, Springer-Verlag, 1998, S. 1–9

[Coquand und Huet 1988] Coquand, Thierry ; Huet, Gerard: The calculus of constructions. In: *Inf. Comput.* 76 (1988), Nr. 2-3, S. 95–120. – ISSN 0890-5401

[Cost u. a. 1999] Cost, R. S. ; Chen, Ye ; Finin, T. ; Labrou, Y. ; Peng, Y.: Modeling agent conversation with colored Petri nets. In: *Workshop on specifying and implementing conversation policies (Autonomous agents '99)*, Springer-Verlag, 1999, S. 565–579

[Crozier und Friedberg 1993] Crozier, Michel ; Friedberg, Erhard: *Macht und Organisation: Die Zwänge kollektiven Handelns.* Frankfurt : Athenäum Verlag, 1993

[Cuena und Ossowski 1999] Cuena, José ; Ossowski, Sascha: Distributed Models for Decision Support. In: (Weiß, 1999)

[Dahrendorf 1958] Dahrendorf, Ralf: Homo Sociologicus. Versuch zur Geschichte, Bedeutung und Kritik der Kategorie der sozialen Rolle. In: Dahrendorf, R. (Hrsg.): *Pfade aus Utopia*. München : Piper, 1958, S. 128–194. – 1967

[DeLoach u. a. 2001] DeLoach, Scott A. ; Wood, Mark F. ; Sparkman, Clint H.: Multiagent Systems Engineering. In: *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering* 11 (2001), Nr. 3, S. 231–258

[Desel u. a. 1992] Desel, Jörg ; Gomm, Dominik ; Kindler, Ekkart ; Walter, Rolf ; Paech, Barbara: Bausteine eines kompositionalen Beweiskalküls für netzmodellierte Systeme / Technische Universität München. 1992. – Forschungsbericht. Sonderforschungsbereich 342: Methoden und Werkzeuge für die Nutzung paralleler Rechnerarchitekturen

[Dignum u. a. 2004] Dignum, Virginia ; Vázquez-Salceda, Javier ; Dignum, Frank: OMNI: Introducing Social Structure, Norms and Ontologies into Agent Organizations. In: *Programming Multi-Agent Systems (PROMAS)*, 2004, S. 181–198

[Dorigo und Gambardella 1997] Dorigo, M. ; Gambardella, L. M.: Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1 (1997), Nr. 1, S. 53–66

[Durfee und Lesser 1991] Durfee, Edmund H. ; Lesser, Victor R.: Partial Global Planning: A Coordination Framework for Distributed Hypothesis Formation. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 21 (1991), September, Nr. 5, S. 1167–1183

[Durkheim 1885] Durkheim, Emile: *Regeln der soziologischen Methode*. Darmstadt/Neuwied : Luchterhand, 1885. – 1970

[Edeling 1999] Edeling, Thomas: Der neue Institutionalismus in Ökonomie und Soziologie. In: Edeling, Thomas (Hrsg.) ; Jann, Werner (Hrsg.) ; Wagner, Dieter (Hrsg.): *Institutionenökonomie und neuer Institutionalismus*. Leske + Budrich, 1999

[Ehrig und Mahr 1985] Ehrig, Hartmut ; Mahr, Bernd: *Fundamentals of algebraic Specification*. Springer-Verlag, 1985 (EATCS Monographs on TCS)

[Eiben und Smith 2003] Eiben, Gusz ; Smith, Jim: *Introduction to evolutionary computing*. Springer-Verlag, 2003

[Eigen und Schuster 1979] Eigen, Manfred ; Schuster, Peter: *The Hypercycle – A Principle of Natural Self-Organization*. Springer-Verlag, 1979

[Elias 1976] Elias, Norbert: *Der Prozess der Zivilisation*. Frankfurt : Suhrkamp, 1976. – (1939), zwei Bde.

[Elias 1987] Elias, Norbert: *Die Gesellschaft der Individuen*. Frankfurt : Suhrkamp, 1987

[Elias und Scotson 1990] Elias, Norbert ; Scotson, John L.: *Etablierte und Außenseiter*. Frankfurt : Suhrkamp, 1990

[Emerson 1990] Emerson, Allen: *Temporal and modal logic*. Bd. B. MIT press, 1990

[Emerson und Clarke 1982] Emerson, Allen ; Clarke, Edmund M.: Using branching time temporal logics to synthesize synchronisation sceletons. In: *Scientific Compututer Programming* 2 (1982), S. 241–266

[Engelfriet 1991] Engelfriet, Joost: Branching processes of Petri nets. In: *Acta Informatica* 28 (1991), S. 575–591

[Esparza 1994] Esparza, Javier: Model checking using net unfoldings. In: *Science of Computer Programming* 23 (1994), Nr. 2, S. 151–195

[Esser 1993] Esser, Hartmut: *Soziologie. Allgemeine Grundlagen.* Frankfurt : Campus, 1993

[Ferber u. a. 2003] Ferber, Jacques ; Gutknecht, Olivier ; Michel, Fabien: From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-agent Systems. In: Giorgini, Paolo (Hrsg.) ; Müller, Jörg P. (Hrsg.) ; Odell, James (Hrsg.): *Agent-Oriented Software Engineering IV* Bd. 2935, 2003, S. 214–230

[Ferber 1999] Ferber, Jaques: *Multi-Agent System: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence.* Addison-Wesley, 1999

[Ferguson 1992] Ferguson, I. A.: Towards an Architecture for adaptive, rational, mobile agents. In: *Decentralized Artificial Intelligence* Bd. 3, Elsevier Science, 1992, S. 249–262

[Fiorino und Tessier 1998] Fiorino, H. ; Tessier, C.: Agent cooperation: a Petri net based model. In: Demazeau, Yves (Hrsg.): *Int. Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'98)*, 1998, S. 425–426

[FIPA 1998] FIPA: FIPA 97 Specification, Part 2 - Agent Communication Language. `http://www.fipa.org` : Foundation for Intelligent Physical Agents, Oktober 1998. – Forschungsbericht

[Flam 1990] Flam, Helena: Emotional Man I: The Emotional Man and the Problem of Collective Action. In: *International Sociology* 5 (1990), S. 39–56

[Florian 1998] Florian, Michael: Die Agentengesellschaft als sozialer Raum: Vorschläge zur Modellierung von „Gesellschaft" in VKI und Soziologie aus der Sicht des Habitus-Feld-Konzeptes von Pierre Bourdieu. In: Malsch, Thomas (Hrsg.): *Sozionik: soziologische Ansichten über Künstliche Intelligenz.* Edition Notema, 1998, S. 297–344

[Floyd 1993] Floyd, Christiane: STEPS - A Methodical Approach to Participatory Design. In: *Communications of the ACM* 36 (1993), Nr. 4, S. 83

[Friedberg 1995] Friedberg, Erhard: *Ordnung und Macht. Dynamiken organisierten Handelns.* Frankfurt and New York : Campus Verlag, 1995

[Gabbay u. a. 1980] Gabbay, Dov ; Pnueli, Amir ; Shelah, Saharon ; Stavi, Jonathan: On The Temporal Analysis of Fairness. In: *Proceedings of the 7th Annual ACM Symposium on Principles of Programming Languages*, 1980, S. 163–173

[Gasser 1991] Gasser, Les: Social Conceptions of Knowledge and Action: DAI Foundations and Open Systems Semantics. In: *Artificial Intelligence* 47 (1991), S. 107–138

[Genrich und Lautenbach 1981] Genrich, Hartmann J. ; Lautenbach, Kurt: System modelling with high-level Petri Nets. In: *Theoretical Foundations of Computer Science* 13(1) (1981), S. 109–136

[Giacomo u. a. 2000] Giacomo, Giuseppe D. ; Lespérance, Yves ; Levesque, Hector J.: ConGolog, a concurrent programming language based on the situation calculus. In: *Artificial Intelligence* 121 (2000), Nr. 1-2, S. 109–169

[Giddens 1984] Giddens, Anthony: *The Constitution of Society.* Cambridge : Polity Press, 1984

[Giddens 1997] Giddens, Anthony: *Die Konstruktion der Gesellschaft.* Campus Verlag, 1997

[Gilbert und Conte 1995] Gilbert, N. (Hrsg.) ; Conte, R. (Hrsg.): *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life.* London : UCL Press, 1995

[Gilbert und Troitzsch 1999] Gilbert, Nigel ; Troitzsch, Klaus G.: *Simulation for the social scientist.* Open University Press, 1999

[Girard u. a. 1989] Girard, Jean-Yves ; Taylor, Paul ; Lafont, Yves: *Cambridge tracts in theoretical computer science.* Bd. 7: *Proofs and types.* Cambridge University Press, 1989

[Girault und Valk 2003] Girault, C. (Hrsg.) ; Valk, R. (Hrsg.): *Petri Nets for System Engineering – A Guide to Modeling, Verification, and Applications.* Springer-Verlag, 2003

[Glaser und Morignot 1997] Glaser, Norbert ; Morignot, Philippe: The Reorganization of Societies of Autonomous Agents. In: Boman, Magnus (Hrsg.) ; Velde, Walter V. de (Hrsg.): *Multi-Agent Rationality, 8th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World* Bd. 1237, Springer-Verlag, 1997, S. 98–111

[Gmür 1993] Gmür, Markus: Organisationstheorien. Entwicklungslinien – Systematik – Kritik. In: Klimecki, R. G. (Hrsg.): *Management: Forschung und Praxis.* Universität Konstanz, 1993

[Godefroid 1996] Godefroid, Patrice: *Partial-order methods for the verification of concurrent systems: an approach to the state-explosion problem.* Springer-Verlag, 1996

[Gödel 1932] Gödel, Kurt: *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter System*, Universität Wien, Habilitationsschrift, 1932

[Goffman 1956] Goffman, Erving: *Wir alle spielen Theater. Die Selbstdarstellung im Alltag.* München : Piper, 1956. – 1973

[Gois u. a. 1998] Gois, Gustavo M. ; Perkusich, Angelo ; Figueiredo, Jorge C. A. de ; Costa, Evandro B.: Towards a Multi-agent Interactive Learning Environment Oriented to the Petri Net Domain. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'98), 11-14 October 1998, San Diego, USA*, Oktober 1998, S. 250–255

[Goltz und Reisig 1983] Goltz, Ursula ; Reisig, Wolfgang: The non-sequential behaviour of Petri nets. In: *Information and Control* 57 (1983), S. 125–147

[Gottschalk 2000] Gottschalk, Karl: Web Services architecture overview / IBM developerWorks. 2000. – Whitepaper

[Gresshoff u. a. 2003] Gresshoff, Rainer (Hrsg.) ; Kneer, Georg (Hrsg.) ; Uwe, Schimank (Hrsg.): *Die Transintentionalität des Sozialen. Eine vergleichende Betrachtung klassischer und moderner Sozialtheorien.* WDV, 2003

[Griffel 1998] Griffel, Frank: *Componentware: Konzepte und Techniken eines Softwareparadigmas.* dpunkt Verlag, 1998

[Knowledge Sharing Initiative External Interfaces Working Group 1993] Group, The D. Knowledge Sharing Initiative External Interfaces Working: Specification of the KQML Agent-Communication Language / DARPA. Juni 1993. – DRAFT

[Grumberg und Long 1994] Grumberg, Orna ; Long, David: Model checking and modular verification. In: *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 16 (1994), Nr. 3, S. 843–871

[Habermas 1981] Habermas, Jürgen: *Theorie des kommunikativen Handelns.* Suhrkamp, 1981

[Habermas 1992] Habermas, Jürgen: *Faktizität und Geltung.* Frankfurt a. M. : Suhrkamp, 1992

[Haken 1990] Haken, Hermann: *Synergetik: eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie.* 3. Auflage. Springer-Verlag, 1990

[Hameurlain u. a. 1999] Hameurlain, N. ; Hanachi, C. ; Sibertin-Blanc, C.: Mobile agents behaviours: from declaratiove specifications to implementations. In: Klusch, Matthias (Hrsg.) ; Shehory, Onn M. (Hrsg.) ; Weiss, Gerhard (Hrsg.): *Proceedings of the third Workshop on Cooperative Information Agents (CIA'99)*, Springer-Verlag, 1999 (Lecture notes in artificial intelligence), S. 196–207

[Harel 1984] Harel, David: Dynamic Logic. In: Gabbay, D. (Hrsg.) ; Guenther, F. (Hrsg.): *Handbook of Philosophical Logic, Volume II — Extensions of Classical Logic.* D. Reidel Publishing Company: Dordrecht, The Netherlands, 1984, S. 497–604

[van Hee u. a. 2003] Hee, Kees van ; Sidorova, Natalia ; Voorhoeve, Marc: Soundness and Separability of Workflow Nets in the Stepwise Refinement Approach. In: *Proceedings of the 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (ICATPN 2003)* Bd. 2679, Springer-Verlag, 2003, S. 337–356

[Hennessy und Milner 1980] Hennessy, Matthew ; Milner, Robin: On observing nondeterminism and concurrency. In: Bakker, J.W. de (Hrsg.) ; Leeuwen, J. van (Hrsg.): *Proc. of the Seventh International Colloquium on Automata Languages and Programming (ICALP)* Bd. 85, Springer-Verlag, 1980, S. 299–309

[Hermes 1971] Hermes, Hans: *Aufzählbarkeit, Entscheidbarkeit, Berechenbarkeit. Einführung in die Theorie der rekursiven Funktionen.* Springer-Verlag, 1971

[Hoffmann u. a. 2005] Hoffmann, Kathrin ; Ehrig, Hartmut ; Mossakowski, Till: High-Level Nets with Nets and Rules as Tokens. In: *Application and Theory of Petri Nets and Other Models of Concurrency* Bd. 3536, Springer-Verlag, 2005, S. 268 – 288

[Hollander 1960] Hollander, Edwin P.: Competence and conformity in the acceptance of influence. In: *Journal of abnormal & social Psychology* 61 (1960), S. 361–365

[Holvoet 1995] Holvoet, Tom: Agents and Petri Nets. In: *Petri Net Newsletter* 49 (1995), Oktober, S. 3–8

[Homans 1960] Homans, George C.: *Theorie der sozialen Gruppe.* WDV, 1960

[Hopcroft und Ullman 1979] Hopcroft, John E. ; Ullman, Jeffrey D.: *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation.* Addison Wesley, 1979

[Horling und Lesser 2005a] Horling, Bryan ; Lesser, Victor: A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. In: *The Knowledge Engineering Review* 19 (2005), Nr. 4, S. 281–316

[Horling und Lesser 2005b] Horling, Bryan ; Lesser, Victor: Using ODML to Model Organizations for Multi-Agent Systems. In: *Proceedings of the 2005 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT 2005).* Compiegne, France : IEEE Computer Society, September 2005, S. 72–80

[Hughes und Cresswell 1984] Hughes, George E. ; Cresswell, Maxwell J.: *A companion to modal logic.* Methuen, 1984

[Jennings 1993] Jennings, Nicholas R.: Commitments and Conventions: The Foundation of Coordination in Multi-Agent Systems. In: *The Knowledge Engineering Review* 8 (1993), Nr. 3, S. 223–250

[Jennings 1996] Jennings, Nicholas R.: Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence. In: O'Hare, G. M. P. (Hrsg.) ; Jennings, N. R. (Hrsg.): *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, Wiley, 1996, S. 187–210

[Jennings 2000] Jennings, Nicholas R.: On agent-based software engineering. In: *Artificial Intelligence* 117 (2000), S. 277–296

[Jensen 1992] Jensen, Kurt: *Coloured Petri nets, Basic Methods, Analysis Methods and Practical Use.* Springer-Verlag, 1992 (EATCS monographs on theoretical computer science)

[Jensen und Rozenberg 1991] Jensen, Kurt (Hrsg.) ; Rozenberg, Grzegorz (Hrsg.): *High-level Petri nets: theory and application.* Berlin : Springer-Verlag, 1991

[Jessen und Valk 1987] Jessen, Eike ; Valk, Rüdiger: *Rechensysteme – Grundlagen der Modellbildung.* Springer-Verlag, 1987

[Joas 1992] Joas, Hans: *Kreatives Handeln.* Suhrkamp, 1992

[Kennedy und Eberhart 2001] Kennedy, James ; Eberhart, Russell C.: *Swarm intelligence.* San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001. – ISBN 1-55860-595-9

[Kephart und Chess 2003] Kephart, Jeffrey O. ; Chess, David M.: The Vision of Autonomic Computing. In: *IEEE Computer* 36 (2003), Nr. 1, S. 41–50

[Kieser 1999] Kieser, Alfred (Hrsg.): *Organisationstheorien.* Stuttgart : Kohlhammer, 1999

[Kindler 1995] Kindler, Ekkart: *Modularer Entwurf verteilter Systeme mit Petrinetzen.* Bertz Verlag, 1995

[Kindler 1997] Kindler, Ekkart: A Compositional Partial Order Semantics for Petri Net Components. In: (Azeme und Balbo, 1997)

[Kirn und Gasser 1998] Kirn, Stefan ; Gasser, Les: *Organizational Approaches to Coordination in Multi-Agent Systems.* 1998

[Kittel und Krömer 1984] Kittel, Charles ; Krömer, Herbert: *Physik der Wärme.* Oldenbourg, 1984

[Klein 1985] Klein, Wolfgang: Argumentationsanalyse. Ein Begriffsrahmen und Beispiel. In: Kopperschmidt, Josef (Hrsg.) ; Schanze, Helmut (Hrsg.): *Argumente – Argumentation. Interdisziplinäre Problemzugänge.* Fink, 1985, S. 208–260

[Kneissler 1996] Kneissler, T.: *Verwaltungen jenseits der Zweckrationalität: Ein organisationstheoretisch angeleiteter Vergleich verschiedener Konzepte.* Baden-Baden : Nomos-Verlag, 1996

[Koestler 1967] Koestler, Arthur: *The Ghost in the Machine.* London : Arkana, 1967

[Köhler 2004] Köhler, Michael: *Objektnetze: Definition und Eigenschaften.* Berlin : Logos Verlag, 2004

[Köhler 2007] Köhler, Michael: A Formal Model of Multi-Agent Organisations. In: *Fundamenta Informaticae* 79 (2007), Nr. 3-4, S. 415 – 430

[Köhler u. a. 2007] Köhler, Michael ; Langer, Roman ; Lüde, Rolf v. ; Moldt, Daniel ; Rölke, Heiko ; Valk, Rüdiger: Socionic Multi-Agent Systems based on Reflexive Petri Nets and Theories of Social Self-Organisation. In: *Journal of artificial societies and social simulation* 10 (2007), Nr. 1. – URL `http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/1/3.html`

[Köhler u. a. 2003a] Köhler, Michael ; Langer, Roman ; Moldt, Daniel ; Rölke, Heiko: *Pierre Bourdieu: Praxis – Kapital – Habitus.* In: *Sozionik: Modellierung soziologischer Theorie.* Münster : Lit-Verlag, 2003 (Wirtschaft – Arbeit – Technik)

[Köhler u. a. 2003b] Köhler, Michael ; Langer, Roman ; Rölke, Heiko: *Sozionisches Modellieren mit Petrinetzen. Ein kommentiertes Protokoll.* In: *Sozionik: Modellierung soziologischer Theorie.* Münster : Lit-Verlag, 2003 (Wirtschaft – Arbeit – Technik)

[Köhler u. a. 2003c] Köhler, Michael ; Langer, Roman ; Rölke, Heiko ; Valk, Rüdiger: *Machtmonopole und soziale Kontrolle – Modellierungen zu Norbert Elias.* In: *Sozionik: Modellierung soziologischer Theorie.* Münster : Lit-Verlag, 2003 (Wirtschaft – Arbeit – Technik)

[Köhler u. a. 2003d] Köhler, Michael ; Lüde, Rolf v. ; Rölke, Heiko ; Spresny, Daniela: *Machtspiele strategischer Akteure: Ein mikropolitisches Organisationsmodell.* In: *Sozionik: Modellierung soziologischer Theorie.* Münster : Lit-Verlag, 2003 (Wirtschaft – Arbeit – Technik)

[Köhler u. a. 2006] Köhler, Michael ; Moldt, Daniel ; Ortmann, Jan: Dynamic Service Composition: A Petri-Net Based Approach. In: Manolopoulos, Y. (Hrsg.) ; Filipe, J. (Hrsg.) ; Constantopoulos, P. (Hrsg.) ; Cordeiro, J. (Hrsg.): *Conference on Enterprise Information Systems: Databases and Information Systems Integration (ICEIS 2006)*, 2006, S. 159–165

[Köhler u. a. 2001] Köhler, Michael ; Moldt, Daniel ; Rölke, Heiko: Modeling the Behaviour of Petri Net Agents. In: Colom, J. M. (Hrsg.) ; Koutny, M. (Hrsg.): *International Conference on Application and Theory of Petri Nets* Bd. 2075, Springer-Verlag, 2001, S. 224–241

[Köhler u. a. 2003e] Köhler, Michael ; Moldt, Daniel ; Rölke, Heiko ; Spresny, Daniela: *Handlung und Struktur. Modellierung von Akteurmodellen.* In: *Sozionik: Modellierung soziologischer Theorie.* Münster : Lit-Verlag, 2003 (Wirtschaft – Arbeit – Technik)

[Köhler und Ortmann 2005] Köhler, Michael ; Ortmann, Jan: Formal Aspects for service modelling based on high-level Petri Nets. In: Mohammadian, M. (Hrsg.): *International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (IAWTIC 2005)*, 2005

[Köhler und Wester-Ebbinghaus 2007a] Köhler, Michael ; Wester-Ebbinghaus, Matthias: Organizational Models and Multi-Agent System Deployment. In: *Multi-Agent Systems and Applications V* Bd. 4696, Springer-Verlag, 2007, S. 307–309

[Köhler und Wester-Ebbinghaus 2007b] Köhler, Michael ; Wester-Ebbinghaus, Matthias: Petri Net-Based Specification and Deployment of Organizational Models. In: *International Workshop on Petri Nets and Software Engineering 2007*, 2007, S. 67–81

[Köhler-Bußmeier und Wester-Ebbinghaus 2008] Köhler-Bussmeier, Michael ; Wester-Ebbinghaus, Matthias: Automatic Generation of Distributed Team Formation Algorithms from Organizational Models. In: Hübner, Jomi (Hrsg.) ; Boissier, Olivier (Hrsg.): *Workshop on Coordination, Organizations, Institutions, and Norms in Agent Systems, COIN'08*, 2008

[Köhler-Bußmeier u. a. 2008] Köhler-Bussmeier, Michael ; Wester-Ebbinghaus, Matthias ; Moldt, Daniel: From Multi-Agent to Multi-Organization Systems: Utilizing Middleware Approaches. In: Artikis, Alexander (Hrsg.) ; Picard, Gauthier (Hrsg.) ; Vercouter, Laurent (Hrsg.): *International Workshop Engineering Societies in the Agents World (ESAW'08)*, 2008

[Köhler-Bußmeier u. a. 2009] Köhler-Bussmeier, Michael ; Wester-Ebbinghaus, Matthias ; Moldt, Daniel: A Formal Model for Organisational Structures behind Process-Aware Information Systems. In: *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency. Special Issue on Concurrency in Process-Aware Information Systems* 5460 (2009), S. 98–114

[Küpper und Felsch 2000] Küpper, Willi ; Felsch, Anke: *Organisation, Macht und Ökonomie. Mikropolitik und die Konstitution organisationaler Handlungssysteme.* Opladen (Westdeutscher Verlag), 2000

[Lamport 1977] Lamport, Leslie: Proving the corretness of multiprocess programs. In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 3 (1977), Nr. 2, S. 125–143

[Lamport 1994] Lamport, Leslie: The temporal logics of actions. In: *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 16 (1994), Nr. 3, S. 872–923

[Langer 2005] Langer, Roman: *Anerkennung und Vermögen: Eine sozialtheoretische Analyse der Selbstorganisation in und von Bildungsinstitutionen.* Münster : Monsenstein & Vannerdat, 2005

[Langer 2006] Langer, Roman: *Hinter den Spiegeln universitärer Governance. Dynamiken informeller Selbstregulierung in der Universität.* Münster : Lit-Verlag, 2006 (Wirtschaft – Arbeit – Technik). – Unter Mitarbeit von Daniela Spresny.

[Langton 1984] Langton, C. G.: Self-reproduction in cellular automata. In: *Physica D* 10 (1984), S. 135–144

[Larsem und Thomson 1991] Larsem, Kim G. ; Thomson, Bent: Partial specifications and compositional specification. In: *Theoretical Computer Science* 88 (1991), S. 15–32

[Levesque und Lakemeyer 2000] Levesque, Hector ; Lakemeyer, Gerhard: *The logic of knowledge bases.* Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2000

[Li und Vitányi 1997] Li, Ming ; Vitányi, Paul: *An introduction to Kolmogorov complexity and its applications.* Springer-Verlag, 1997. –

[Loeckx u. a. 1996] Loeckx, Jacques ; Ehrich, Hans-Dieter ; Wolf, Markus: *Specification of Abstract Data Types.* New York, Leipzig : Wiley & Sons and B.G. Teubner, 1996

[Luckmann 1992] Luckmann, Thomas: *Theorie des sozialen Handelns.* Berlin : de Gruyter, 1992

[v. Lüde u. a. 2003] Lüde, R. v. ; Moldt, D. ; Valk, R. ; Köhler, M. ; Langer, R. ; Rölke, H. ; Spresny, D.: *Sozionik: Modellierung soziologischer Theorie.* Münster : Lit-Verlag, 2003 (Wirtschaft – Arbeit – Technik). – URL `http://www.lit-verlag.de/isbn/3-8258-5980-0`

[Luhmann 1964] Luhmann, Niklas: Lob der Routine. In: *Verwaltungsarchiv* 55 (1964), S. 1–33

[Luhmann 1971] Luhmann, Niklas: Sinn als Grundbegriff der Soziologie. In: Luhmann, N. (Hrsg.) ; Habermas, J. (Hrsg.): *Theorie der Gesellschaft oder Sozialtechnologie – Was leistet die Systemforschung?* Frankfurt a. M. : Suhrkamp, 1971, S. 25–100

[Luhmann 1972] Luhmann, Niklas: Einfache Sozialsysteme. In: *Zeitschrift für Soziologie* 1 (1972), S. 51–65

[Luhmann 1984] Luhmann, Niklas: *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie.* Frankfurt a. M. : Suhrkamp, 1984

[Mainzer 1999] Mainzer, Klaus (Hrsg.): *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft: Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert.* Springer-Verlag, 1999. – www.philso.uni-augsburg.de/dgksnd/

[Malsch 1996] Malsch, Thomas (Hrsg.): *Sozionik: soziologische Ansichten über Künstliche Intelligenz.* Edition Sigma, 1996

[Malsch 2001] Malsch, Thomas: Naming the unnamable: Socionics or the sociological turn of/to distributed artificial intelligence. In: *Autonomous agents and multi-agent systems* 4 (2001), S. 155–186

[Malsch 2002] Malsch, Thomas: DFG Priority Program (SPP-1077) Socionics – Investigating and Modelling Artificial Societies. In: Jarke, M. (Hrsg.): *KI 2002: Advances in Artificial Intelligence: 25th Annual German Conference on AI, KI 2002* Bd. 2479. Heidelberg : Springer-Verlag, 2002, S. 325–326

[Malsch u. a. 1998] Malsch, Thomas ; Müller, H. J. ; Schulz-Schaeffer, Ingo: SOCIONICS: Introduction and Potential. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 1 (1998), Nr. 3. – www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/3/5.html

[Mandelbrot 1982] Mandelbrot, Benoit B.: *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, 1982

[Manna und Pnueli 1995] Manna, Zohar ; Pnueli, Amir: *Temporal verification of reactive systems*. Springer-Verlag, 1995

[March und Simon 1958] March, James ; Simon, Herbert A.: *Organizations*. New York : Wiley, 1958

[March und Simon 1989] March, James ; Simon, Herbert A.: *Rediscovering Organizations*. New York : Free Press, 1989

[Marcuse 1989] Marcuse, Herbert: *Der eindimensionale Mensch*. Darmstadt : Luchterhand, 1989

[Martens 1997] Martens, Wil: Organisation und gesellschaftliche Teilsysteme. In: Ortmann, Günther (Hrsg.) ; Sydow, Jörg (Hrsg.) ; Türk, Klaus (Hrsg.): *Theorien der Organisation*. WDV, 1997

[Maude 1999] Clavel, Manuel ; Durán, Francisco ; Eker, Steven ; Lincoln, Patrick ; Martí-Oliet, Narciso ; Meseguer, José ; Quesada, José: *Maude: Specification and Programming in Rewriting Logic. Maude System documentation*. `http://maude.cs.uiuc.edu/maude1/` : , 1999

[Mazurkiewicz 1987] Mazurkiewicz, Antoni: Trace Theory. In: Brauer, W. (Hrsg.) ; Reisig, W. (Hrsg.) ; Rozenberg, G (Hrsg.): *Advances in Petri nets* Bd. 255, Springer-Verlag, 1987, S. 279–324

[McCulloch und Pitts 1943] McCulloch, W. ; Pitts, W.: A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. In: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5/115 (1943)

[McMillan 1993] McMillan, Keneth L.: *Symbolic Model Checking*. Kluwer Academic, 1993

[de Meer und Koppen 2005] Meer, Hermann de ; Koppen, Christian: Characterization of Self-Organization. In: Steinmetz, Ralf (Hrsg.) ; Wehrle, Klaus (Hrsg.): *Peer-to-Peer Systems and Applications* Bd. 3485, Springer, 2005, S. 227–246. – ISBN 3-540-29192-X

[Meinhardt 1998] Meinhardt, Hans: *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*. Springer-Verlag, 1998

[Merton 1957] Merton, Robert K.: Der Rollen-Set. In: Hartmann, H. (Hrsg.): *Moderne amerikanische Soziologie*. Stuttgart : Enke, 1957, S. 316–333

[Meseguer 1997] Meseguer, José: Membership algebra as a logical framework for equational specification. In: Parisi-Presicce, Francesco (Hrsg.): *Workshop on Algebraic Development Techniques (WADT'97)* Bd. 1376, Springer-Verlag, 1997, S. 18–61

[Milner 1989] Milner, Robin: *Communication and Concurrency*. Prentice Hall, 1989

[Moldt und Wienberg 1997] Moldt, Daniel ; Wienberg, Frank: Multi-Agent-Systems Based on Coloured Petri Nets. In: (Azeme und Balbo, 1997), S. 82–101

[Morgan 1997] Morgan, Gareth: *Bilder der Organisation*. Stuttgart : Klett-Cotta, 1997

[zur Mühlen 1999] Mühlen, Michael zur: Evaluation of Workflow Management Systems Using Meta Models. In: *Proceedings of the Thirty-second Annual Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 5*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 1999

[Müller und Pischel 1994] Müller, Jörg P. ; Pischel, Markus: An architecture for dynamically interacting agents. In: *Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems* 3 (1994), Nr. 1, S. 25–45

[Müller 1993] Müller, Jürgen: *Verteilte künstliche Intelligenz: Methoden und Anwendungen*. B-I-Wiss.-Verlag, 1993

[Nagendra u. a. 1996] Nagendra, Prasad ; Garvey, Alan ; Decker, Keith ; Lesser, Victor: Exploring Organizational Designs with TAEMS: A case study of distributed data processing. In: *Second International Conference on Multi-Agent Systems* (1996), January, S. 283–290

[von Neumann 1966] Neumann, John von ; Burks, A. (Hrsg.): *The Theory of Self-reproducing Automata*. Univ. of Illinois Press, 1966

[Nierstrasz 1993] Nierstrasz, Oscar: Composing active objects. In: *Research directions in concurrent object-oriented programming*. MIT Press, 1993, Kap. 5

[OASIS 1993–2007] : *Organization for the Advancement of Structured Information Standards*. www.oasis-open.org. 1993-2007

[Ogbuji und Ouellet 2002] Ogbuji, Uche ; Ouellet, Roxane: *DAML Reference*. online: `http://www.xml.com/pub/a/2002/05/01/damlref.html`. 2002

[Ortmann u. a. 1997] Ortmann, G. ; Sydow, J. ; Türk, K.: *Theorien der Organisation: Die Rückkehr der Gesellschaft*. Westdeutscher Verlag, 1997

[Ossowski 1999] Ossowski, Sascha: *Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 1535: *Co-ordination in Artificial Agent Societies: social structures and its implications for autonomous problem-solving agents*. Springer-Verlag, 1999

[Padberg u. a. 1998] Padberg, J. ; Gajewsky, M ; Ermel, C.: Rule-based refinement of high-level nets preserving safety properties. In: Astesiani, E. (Hrsg.): *Proceedings of ETAPS-FASE: Fundamental approaches to software engineering*, Springer-Verlag, 1998 (LNCS 1382), S. 221–238

[Padberg u. a. 1995] Padberg, J. ; Mahr, E. ; Ribeiro, L.: Algebraic high-level net transformation systems. In: *Mathematical structures in computer science* (1995), Nr. 5, S. 217–256

[Panzarasa und Jennings 2001] Panzarasa, Pietro ; Jennings, Nicholas: The organisation of sociality: A manifesto for a new science of multiagent systems. In: *Proceedings of the Tenth European Workshop on Multi-Agent Systems (MAAMAW01)*, 2001

[Panzarasa u. a. 2002] Panzarasa, Pietro ; Jennings, Nicholas R. ; Norman, Timothy J.: Formalizing Collaborative Decision-making and Practical Reasoning in Multi-agent Systems. In: *Journal of Logic and Computation* 12 (2002), Nr. 1, S. 55–117

[Park 1980] Park, D. M. R.: *Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 104: *Concurrency and Automata on Infinte Sequences*. Springer-Verlag, 1980

[Park 1976] Park, David: Finiteness is Mu-Ineffable. In: *Theoretical Computer Science* 3 (1976), Nr. 2, S. 173–181

[Parsons 1937] Parsons, Talcot: *The Structure of Social Action.* New York : Free Press, 1937. – 1949

[Paslack 1991] Paslack, Rainer: *Urgeschichte der Selbstorganisation.* Vieweg, 1991

[Petri 1962] Petri, Carl A.: Kommunikation mit Automaten. Bonn : Rheinisch-Westfälisches Institut für Instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn, 1962. – Dissertation

[Petri und Reisig 2008] Petri, Carl A. ; Reisig, Wolfgang: Petri net. In: *Scholarpedia* 3 (2008), Nr. 4, S. 6477

[Pnueli und Lichtenstein 1985] Pnueli, Amir ; Lichtenstein, Orna: Checking that Finite State Concurrent Programs Satisfy their Linear Specification. In: *Conference record of the 14th ACM Symposium on Principles of Programming Languages (POPL)*, 1985, S. 97–107

[Popitz 1981] Popitz, Heinrich: *Die normative Konstruktion von Gesellschaft.* Tübingen : Mohr, 1981

[Popitz 1999] Popitz, Heinrich: *Phänomene der Macht.* Tübingen : Mohr, 1999

[Powell und DiMaggio 1991] Powell, Walter (Hrsg.) ; DiMaggio, Paul (Hrsg.): *The New Institutionalism in Organisational Analysis.* Chicago : University of Chicago Press, 1991

[Prietula u. a. 1998] Prietula, Michael J. (Hrsg.) ; Carley, Kathleen M. (Hrsg.) ; Gasser, Les (Hrsg.): *Simulating Organisations. Computational Models of Institutions and Groups.* AAAI/MIT-Press, 1998

[Prigogine und Stengers 1993] Prigogine, Ilya ; Stengers, Isabelle: *Das Paradox der Zeit: Zeit, Chaos und Quanten.* Piper, 1993

[Prusinkiewicz und Lindenmayer 1990] Prusinkiewicz, Przemyslaw ; Lindenmayer, Astrid: *The algorithmic beauty of plants.* Springer-Verlag, 1990

[Queille und Sifakis 1981] Queille, Jean-Pierre ; Sifakis, Joseph: *Specification and verification of concurrent systems in Cesar.* 1981

[Rao 1996] Rao, Anand S.: AgentSpeak(L): BDI Agents Speak Out in a Logical Computable Language. In: Hoe, Rudy van (Hrsg.): *Seventh European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, 1996

[Rao und Georgeff 1991] Rao, Anand S. ; Georgeff, Michael P.: Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture. In: Allen, James (Hrsg.) ; Fikes, Richard (Hrsg.) ; Sandewall, Erik (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'91)*, Morgan Kaufmann, 1991, S. 473–484

[Reisig und Rozenberg 1998] Reisig, W. (Hrsg.) ; Rozenberg, G. (Hrsg.): *Lectures on Petri Nets I: Basic Models.* Bd. *1491.* Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1998. (Lecture Notes in Computer Science)

[Reisig 1988] Reisig, Wolfgang: Temporal logics and causality in concurrent systems – Petri net models of distributed algoritms. In: Vogt, F. H. (Hrsg.): *International Conference on Concurrency 88* Bd. 335. Springer-Verlag, 1988

[Reisig 1991] Reisig, Wolfgang: Petri nets and algebraic specifications. In: *Theoretical Computer Science* 80 (1991), S. 1–34

[Renew 1998–2009] Kummer, Olaf ; Wienberg, Frank ; Duvigneau, Michael: *The Reference Net Workshop (Renew).* Universität Hamburg, Fachbereich Informatik (Veranst.), 1998-2009. – http://www.renew.de

[Rinderle-Ma und Reichert 2007] Rinderle-Ma, Stefanie ; Reichert, Manfred: A Formal Framework for Adaptive Access Control Models. In: *Journal on Data Semantics IX*, Springer-Verlag, 2007 (Lecture Notes in Computer Science), S. 82–112

[Rolf 1998] Rolf, Arno: *Grundlagen der Organisations- und Wirtschaftsinformatik.* Springer, 1998

[Rölke 2004] Rölke, Heiko: *Modellierung von Agenten und Agentensystemen: Grundlagen und Anwendungen.* Berlin, Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Dissertation, 2004

[Rumbaugh u. a. 1999] Rumbaugh, J. ; Jacobson, I. ; Booch, G.: *The unified modeling language reference manual: The definitive reference to the UML from the original designers.* Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1999 (Addison-Wesley object technology series)

[Saam 2001] Saam, Nicole J.: Social norms for co-operative agents. In: Saam, N. J. (Hrsg.) ; Schmidt, B. (Hrsg.): *Cooperative Agents: Applications in the social sciences* Bd. 32. Dordrecht, Boston, London : Kluwer Academic Publishers, 2001, S. 39–56

[Salomaa 1987] Salomaa, Arto: *Formal languages.* San Diego, CA, USA : Academic Press Professional, 1987

[Sandholm 1999] Sandholm, Tuomas W.: Distributed Rational Decision Making. In: (Weiß, 1999), S. 201–258

[Sassone 1998] Sassone, Vladimiro: An Axiomatization of the Category of Petri Net Computations. In: *Mathematical Structures in Computer Science* 8 (1998), Nr. 2, S. 117–151

[Schillo 2003] Schillo, Michael: Self-Organization and Adjustable Autonomy: Two Sides of the Same Coin? In: *Connection Science* 14 (2003), Nr. 4, S. 345–360

[Schillo u. a. 2000] Schillo, Michael ; Fischer, Klaus ; Klein, Christof: The Micro-Macro Link in DAI and Sociology. In: Moss, S. (Hrsg.) ; Davidsson, P. (Hrsg.): *Second International Workshop on Multi-Agent Based Simulation* Bd. 1979, Springer-Verlag, 2000, S. 133–148

[Schillo und Spresny 2005] Schillo, Michael ; Spresny, Daniela: Organization: The Central Concept for Qualitative and Quantitative Scalability. In: Fischer, Klaus (Hrsg.) ; Florian, Michael (Hrsg.) ; Malsch, Thomas (Hrsg.): *Socionics: Sociability of Complex Social Systems* Bd. 3413, Springer-Verlag, 2005

[Schimank 2000] Schimank, Uwe: *Handeln und Strukturen. Einführung in die akteurstheoretische Soziologie.* Juventa, 2000

[Schmidt-Schauß und Smolka 1991] Schmidt-Schauss, M. ; Smolka, G.: Attributive concept descriptions with complements. In: *Articial Intelligence* 48 (1991), Nr. 1, S. 1–26

[Schröter u. a. 2003] Schröter, Claus ; Schwoon, Stefan ; Esparza, Javier: The Model-Checking Kit. In: Aalst, Wil van der (Hrsg.) ; Best, Eike (Hrsg.): *Applications and Theory of Petri Nets 2003* Bd. 2679, Springer-Verlag, June 2003, S. 463–472

[Schumacher 2001] Schumacher, Michael: *Objective coordination in multi-agent system engineering: design and implementation.* Springer-Verlag, 2001

[Schütz und Luckmann 1990] Schütz, Alfred ; Luckmann, Thomas: *Strukturen der Lebenswelt.* Suhrkamp, 1990

[Scott 1986] Scott, Richard: *Grundlagen der Organisationstheorie.* Frankfurt am Main : Campus, 1986

[Scott 1995] Scott, Richard: *Institutions and Organizations.* London, New Delhi : Sage, 1995

[Searle 1970] Searle, John R.: *Speech acts: An essay in the philosophy of Language.* Cambridge University Press, 1970

[Serugendo 2003] Serugendo, Giovanna Di M.: Engineering Emergent Behaviour: A Vision. In: Hales, David (Hrsg.) ; Edmonds, Bruce (Hrsg.) ; Norling, Emma (Hrsg.) ; Rouchier, Juliette (Hrsg.): *Multi-Agent-Based Simulation III* Bd. 2927, Springer, 2003, S. 1–7

[Serugendo u. a. 2004] Serugendo, Giovanna Di M. (Hrsg.) ; Foukia, Noria (Hrsg.) ; Hassas, Salima (Hrsg.) ; Karageorgos, Anthony (Hrsg.) ; Mostéfaoui, Soraya K. (Hrsg.) ; Rana, Omer F. (Hrsg.) ; Ulieru, Mihaela (Hrsg.) ; Valckenaers, Paul (Hrsg.) ; Aart, Chris V. (Hrsg.): *Self-Organisation: Paradigms and Applications.* Bd. *2977.* Springer-Verlag, 2004. (Lecture Notes in Computer Science). – 1–19 S

[Shankar 1998] Shankar, Udaya: Machine-assisted verifcation using theorem proving and model checking. In: Broy, M. (Hrsg.): *Mathematical methods in programm development*, Springer-Verlag, 1998

[Shoham 1990] Shoham, Yoav: Agent-oriented programming / Stanford, Calif.: Department of Computer Science, Stanford University. 1990. – Forschungsbericht

[Shoham und Tennenholtz 1994] Shoham, Yoav ; Tennenholtz, Moshe: On social laws for artificial agent societies: off-line design. In: *Artificial Intelligence* 72 (1994), Nr. 1-2, S. 231–252

[Smith u. a. 2004] Smith, Michael K. ; Welty, Chris ; McGuinness, Deborah L.: *OWL Web Ontology Language Guide. W3C Recommendation.* `http://www.w3.org/TR/owl-guide/`. 2004

[Smith 1977] Smith, Reid G.: The contract net: A formalism for the control of distributed problem solving. In: *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-77)*, 1977

[Sofsky 1996] Sofsky, Wolfgang: *Traktat über die Gewalt*. Frankfurt/M. : S. Fischer, 1996

[Sozionik 1998] SPP Sozionik: *Sozionik: Erforschung und Modellierung künstlicher Sozialität*. http://www.tu-harburg.de/tbg/SPP/spp-antrag.html. 1998. – Antragstext zum DFG-Schwerpunktprogramm *Sozionik*.

[Steimle 2008] Steimle, Jürgen: *Algorithmic Mechanism Design*. Springer, 2008

[Stolzenburg 1997] Stolzenburg, Gabriel: Kann die Untersuchung der Grundlagen der Mathematik uns etwas über das Denken verraten? In: Watzlawick, Paul (Hrsg.): *Die erfundene Wirklichkeit*. Piper, 1997, S. 236–293

[Studer u. a. 2003] Studer, Rudi ; Hotho, Andreas ; Stumme, Gerd ; Volz, Raphael: Semantic Web – State of the Art and Future Directions. In: *Künstliche Intelligenz* 3 (2003), S. 5–9

[Thomas 1990] Thomas, Wolfgang: Automata on infinite objects. In: Leeuwen, J. van (Hrsg.): *Handbook of Theoretical Computer Science: Formal Models and Semantics*. Elsevier, 1990, S. 133–192

[Thürmer-Rohr 1987] Thürmer-Rohr, Christina: *Vagabundinnen*. Berlin : Orlanda, 1987

[Türk 1989] Türk, Klaus: *Neuere Entwicklungen in der Organisationsforschung: Ein Trend Report*. Stuttgart : Enke Verlag, 1989

[Turner und Jennings 2001] Turner, Phillip J. ; Jennings, Nicholas R.: Improving the Scalability of Multi-agent Systems. In: *Proceedings of the First International Workshop on Infrastructure for Scalable Multi-Agent Systems* Bd. 1887, Springer-Verlag, 2001, S. 246ff.

[Ullman-Margalit 1977] Ullman-Margalit, Edna: *The Emergence of Norms*. Clarendon Press, 1977

[Valk 1991] Valk, Rüdiger: Modelling Concurrency by Task/Flow EN Systems. In: *3rd Workshop on Concurrency and Compositionality*. St. Augustin, Bonn : Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung, 1991 (GMD-Studien 191)

[Valk 2003] Valk, Rüdiger: Object Petri nets: Using the nets-within-nets paradigm. In: Desel, Jörg (Hrsg.) ; Reisig, Wolfgang (Hrsg.) ; Rozenberg, Grzegorz (Hrsg.): *Advanced Course on Petri Nets 2003* Bd. 3098, Springer-Verlag, 2003, S. 819–848

[Valmari 1990] Valmari, Antti: Compositional State Space Generation. In: Rozenberg, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference on Application and Theory of Petri Nets* Bd. 524, Springer-Verlag, 1990, S. 43–62

[Valmari 1994] Valmari, Antti: *Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 815: *Compositional Analysis of place-bordered Subnets*. Springer-Verlag, 1994

[Vardi und Wolper 1994] Vardi, Moshe Y. ; Wolper, Pierre: Reasoning About Infinite Computations. In: *Information and Computation* 115 (1994), 15 , Nr. 1, S. 1–37

[Walker und Wooldridge 1995] Walker, A. ; Wooldridge, M. J.: Understanding the Emergence of Conventions in Multi-Agent Systems. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Multiagent Systems (ICMAS'95)*, 1995

[Weber 1922] Weber, Max: *Wirtschaft und Gesellschaft.* Tübigen : Mohr, 1922. – 1972

[Weiß 1999] Weiss, Gerhard (Hrsg.): *Multiagent systems: A modern approach to Distributed Artificial Intelligence.* MIT Press, 1999

[Weiß und Jakob 2004] Weiss, Gerhard ; Jakob, Ralf: *Agentenorientierte Softwareentwicklung: Methoden und Tools.* Springer-Verlag, 2004

[Whitehead und Russell 1910] Whitehead, Alfred N. ; Russell, Bertrand: *Principia mathematica.* Cambridge : Cambridge University Press, 1910. – Set of three volumes

[Willke 1982] Willke, Helmut: *Systemtheorie I: Grundlagen.* Stuttgart : UTB, 1982

[Winskel 1986] Winskel, Glynn: Petri nets, morphism, and compositionality. In: Rozenberg, G. (Hrsg.): *Advances in Petri nets* Bd. 222. Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1986, S. 453–477

[Winston 1992] Winston, Patrick H.: *Artificial Intelligence.* Addison-Wesley, 1992. – 3. Aufl.

[Wooldridge 2000] Wooldridge, Michael: *Reasoning about Rational Agents.* Cambridge, Massachussetts/London : MIT Press, 2000 (Intelligent robotics and autonomous agents)

[Wooldridge und Jennings 1995] Wooldridge, Michael J. ; Jennings, Nicholas R.: Agent Theories, Architectures, and Languages: a Survey. In: Wooldridge, M. J. (Hrsg.) ; Jennings, N. R. (Hrsg.): *Intelligent Agents*, Springer-Verlag, 1995, S. 1–22

[Zambonelli u. a. 2003] Zambonelli, Franco ; Jennings, Nicholas R. ; Wooldridge, Michael: Developing multiagent systems: The Gaia methodology. In: *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.* 12 (2003), Nr. 3, S. 317–370

Index

$A(p_0)$-Team, 352
F-verbunden, 92
O-lokal, 408
O-transparent, 410
R-Komponente, 319
T-schlicht, 92, 300, 318
Σ-Algebra, 302
$\mathcal{C}_R$, 106
k-beschränkt, 101
k-korrekt, 313
k-sicher, 101

Ablaufnetz, 300
Abschlussystem, 277
abstrakte Datentypen, 300
abstraktes Entitatensystem, 274
Abstraktion, 87
Ackermann-Funktion, 26
Agentenkommunikationssprache, 54
Akkumulation, *siehe* Kapitalakkumulation
Akteurmodelle, 225
Akteursstrategien, 146
Akteurstheorie, 74, 153
Aktivierung, 96, 308
akzeptiert G, 360
algorithmic mechanism design, 60
Anerkennung, 181, 194, 198
    praktische, 182, 196
Anfangswertproblem, 19
Angst, 162, 163, 167
Attraktor, 20
Aufgabe, 337
Aufgaben, 67
aufzählbar, 23
Außenseiter, 174
Außenseiter, 158, 169, 173, 175, 176, 178, 179
Auswertung, 302
Autokatalyse, 131
Autonomie, 10
Autopoiese, 21
Außenwelt, 270

BDI-Logik, 52
bearbeitbar, 338
Bedingtheit
    wechselseitige, 109
beschränkt, 101, 308
Bezirk, 105
Bindung, 307, 308
    dynamische, 440
Bisimulation, 323
blackboard, 54
bounded rationality, 140

Churchsche These, 23
Computation Tree Logic, 325
Computational Organsisation Theory, 67
Contract-Net Protocol, 59, 335
CPN-Netze, 300
CTL, 327

Datentyp-Spezifikation, 301
Delegation, 337
Delegationsnetz, 337
Denken
    strategisches, 144
    systemisches, 144
Diagonalsprache, 23
Dialektik, 218
Dienstklasse, 332
Dienstnetz, 308
    korrekt gesteuertes, 331
Dienstnetze, 299
Differentialgleichung
    homogen, 12
    inhomogen, 12

Differenzierung
funktionale, 160, 161, 163, 171, 178
Disposition, 189, 191, 195, 198
Distinktion, 172, 173, 181
dominant, 60
Dualität, *siehe* Dialektik
dynamic logic, 61

e-commerce, 437
Einfluss, 132
elementare, 367
emergent, 40
Emotion, 126, 162, 167, 171, 176, 177
Emotional Man, 126
endlich, 95
endlich verzweigend, 92
Endlicher Automat, 22
Entartungsfunktion, 37
Entität, 271
Entitätensystem
harmonisches, 276
Entitätensystem, 274, 276
Entropie, 36, 38
entscheidbar, 23
Entscheidungstheorie, 140
Epifaltung, 94
Ereignisnetz, 104
erfüllbar, 305
Erfüllbarkeitsproblem, 39
erreichbaren Markierungen, 98
Erreichbarkeitsgraph, 99
Erwartung, 117, 208
Erwartungserwartungen, 210
Erzeugungsformel, 187, 201–203
Etablierte, 158, 168, 171–176, 179
Existenzbedingung, 186, 188, 191

Faltung, 87, 88, 94, 105
Farbspezifikation, 306
Feld
soziales, 186–188, 193, 196, 202
Flussrelation, 92
Fortschrittseigenschaft, 106
Fremdzwang, 164, 170
Funktionalismus, 115

Gemeinsamkeiten
Analyse auf, 221
geschichtete Organisation, 418
geschlossen, 277, 318
Geschmack, 190, 195, 201
Gesellschaftstheorie, 74, 153
Glauben
praktischer, 187, 196
globale Steuerung, 350
Gradientenverfahren, 33
Graphersetzungssysteme, 404
Grundterm, 301
Gruppennetz, 352

Hürde, 97
Habitus, 166, 186, 189, 191, 195
zivilisierter, 162
Halteproblem, 23, 28
Handeln
soziales, 116
Handlungsfreiraum, 145
Handlungskomplex, 274
Handlungslogik, 150, 274
Handlungsregel, 274
Handlungsregelsystem, 276
Handlungsregelwerk, 274
Handlungssystem
strukturiertes, 144, 147
Handlungsthema, 274
Holon, 386
holonische Organisation, 372
holonische Positionen, 373
Homo Sociologicus, 119
homogen, 276, 346
Human Relationship-Bewegung, 140
Hypothesen, 208

Identität, 127
Imprädikativität, 28
Inkonsistenz, 153
Inkorporation, 391
Innenwelt, 270
Institution, 186, 196
Institutionalisierung, 183, 200
Institutionenökonomie, 141
Integration, 128
Interdependenz, 123

interpretativem Paradigma, 113
Intersubjektivität, 114

joint commitment, 63

Kampf, 183, 185, 191, 197, 198, 201
Kapital, 180
    ökonomisches, 180
    inkorporiertes, *siehe* Habitus, 186
    kulturelles, 183, 201
    objektiviertes, 186, 194
    soziales, 184
    symbolisches, 180, 181, 196, 202
Kapitalakkumulation, 187, 189, 198
Kausalnetz, 104
Kellerautomaten, 22
Key-Server, 440
Klatsch, 168, 169
Klique, 105
Kolmogorov-Komplexität, 35
Kommunikationsaquivalenz, 323
kommunikationsbisimilar, 324
Kommunikationsbisimulation, 323
Kommunikationserweiterung, 322
Kommunikationskanal, 307
Komplexitätsreduktion, 11
Komposition
    schwache, 317
Konfiguration, 353
Konflikt, 163, 167, 171
Konfliktrelation, 105
Kongruenzalgebra, 303
Konkurrenz, 58
Kontingenz, 201, 202
Kontingenztheorie, 140
Konzept, 304
Konzeptbeschreibungen, 304
Kooperation, 58
koordinierende Organisation, 366
koordinierendes Team, 349
Kopf, 375
korrekt, 311
Kripkemodell, 328
kritischen Punkte, 20

Langsicht, 162, 171, 174, 178
Legitimation, 182, 196, 198
Lindenmayer-System, 30
Linear Time Logic, 325
Linie, 105
Logik
    praktische, 187, 189, 191, 203
Logik der Aggregation, 155, 218
Logik der Selektion, 112, 155, 218
Logik der Situation, 112, 155, 218
Lokalität, 91
LTL, 327, 328

Möglichkeitsraum, 286, 287
Macht, 144, 149, 151, 183, 196, 198
Machtquellen, 150
Machtzentrum, 166–168, 171–173, 175, 178, 179
Makro-Ebene, 157
Markierung, 95
    erreichbare, 98
MAS-Grundstruktur, 359
MAS-Organisation, 66, 383
Mazurkiewicz-traces, 101
Meinung
    soziale, 166, 168, 173, 176
MEL, *siehe* Membership Equational Logic
MEL-Axiom, 301
MEL-Formel, 301
Membership Equational Logic, 300
Meso-Ebene, 157
Meta-Planer, 287, 351, 415
Meta-Planung, 391
Meta-Theorie, 85
Mikro-Ebene, 157
Mikropolitischen Ansatz, 141
Mitgliedsagenten, 435
Modallogik, 325
modellgetriebene Software-Entwicklung, 454
Monopol, 160, 173, 178, 200
Multiagentensystem
    wohlkoordiniertes, 362
Multimenge, 95, 100

Nachbereich, 24, 92
Nachfolgemarkierung, 96, 308
Nash-Gleichgewicht, 60

Nebenläufigkeit, 91, 99
Netz
    algebraisches, 300
    endliches, 92
Netze in Netzen, 215
Netzisomorphismus, 94
Netzkomponente, 318
Netzmorphismus, 94
Norm, 117, 164, 168–170, 172, 174, 177, 195, 197

Objektivierung, 183, 186, 194, 200
offene Agentensysteme, 70
offene Systeme, 10
Offizialisierung, 195, 198
operationale Ebene, 398
Operationale Geschlossenheit, 10
Operator, 300
Ordnung
    partielle, 329
Ordnungssicherheit, 208
Organisation, 144, 366
    koordinationsstabile, 381
organisationalen Lernen, 457
organisationellen Intelligenz, 66, 365
Organisationsdesign, 72
Organisationsmetrik, 428
Organisationsnetz, 366
Organisationsstruktur, 68, 366
    formale, 150
organisiert, 378

P/T-Netz, 95, *siehe* Netz
P/T-System, 95
Pareto-Optimalität, 60
Parikh-Vektor, 97
Partial Global Planning Protocol, 59, 335
peer-to-peer, 32
Periphere, *siehe* Außenseiter, 171, 173–175, 177
Petrinetz, 92, *siehe* Netz
    lebendiges, 103
    strukturell lebendiges, 103
Pfadabhängigkeit, 10, 41
Pflichten, 69
Phasenraum, 12
Planer, 287, 351
Position, 118, 366
    intiale, 367
    komplexe, 367
    terminale, 367
Positionen, 69, 138, 365
Positionsagenten, 381
Prädikaten/Transitionsnetz, 300
Produktion symbolischen Kapitals, 184
Profit
    sozialer, 181, 183, 186, 201
Prozess, 89, 105, 114, 318
    sozialer, 220
Prozess von $D[R]$, 321
Prozesse
    zugelassene, 349
Prozessformeln, 333
Prozesslogik, 329
Prozessmodell, 330

R/D-Netz, 341
Rand, 93
Rational Choice, 122
Reanalyse, 157
Rechte, 69
Redundanz, 430
Reflexivität, 50
rekursiv, 27
Rekursivitat, 272
role making, 119
role taking, 119
Rolle, 69, 118, 146, 366
Rollenkonflikt
    Inter-, 120
    Intra-, 119
Rollenprofile, 306
Rollenstruktur, 306

Schalten, 308
Schaltfolgen, 97
Schaltmodus, 308
Scham, 163, 171, 179
schlicht, 92
schlingenfrei, 92
Schmetterlingseffekt, 14
Schnitt, 105

schwache Korrektheit, 312
Sektionsfunktionen, 358
Selbstorganisation, 3, 298
Selbststeuerung, 161, 163, 166, 168
selbstwahrnehmend, 276
Selbstzwang, 162, 164, 173
Selbstähnlichkeit, 268, 271
seltsamen Attraktoren, 21
semantic web, 58
semi-abgeschlossen, 374
semi-entscheidbar, 23
sicher, 102
sicher bearbeitbar, 338
Sicht, 217
Signatur, 300
simpel, 96
Sinn
    praktischer, 188, *siehe* Habitus, 189, 203
Skalierungsproblematik, 50
Social Simulation, 1
Sonar-Agent, 287, 353
Sonar-MAS, 359, 383, 384
Sorte, 300
Sozialität, 50
Spiel, 60, 145, 148
Stelle, 92
    vollständige, 343
Stellvertreter, 375
Steuerung, 379
Stigma, 169, 173, 175
Strategien, 144, 149
strategische Ebene, 398
Struktur, 180, 186, 188, 190
    rekursive, 272
    soziale, 109
Struktur von Prozessen, 90
Strukturalismus, 115
Strukturelemente, 116
strukturell beschränkt, 102
strukturell korrekt, 311
strukturierte Handlungssysteme, 144
Suborganisation, 374
subsumiert, 305
Subsumption, 304
Subteam, 342
Superposition, 12, 40
swarm intelligence, 34
Symbol
    distinktives, 181, 183, 193, 197, 202
symbolischer Interaktionismus, 113
Synergetik, 43
System F, 28
Systemtheorie, 115
Szillard-Sprachen, 339

Tätigkeit, 366
Tätigkeitspfade, 337
taktische Ebene, 398
Team, 352
Teamdienst, 350
Teamkonstruktor, 390
Teamnetz, 341
Teamsteuerung, 350
Teamtransformation, 414
Technologien, 69
Teilnetz, 92
Temporallogik, 325
Term, 301
Termalgebra, 303
Theorie, 303
    Gemeinsamkeiten, 154
    Meta-, 85
Theorie sozialer Selbstorganisation, 229
tot, 103
Transformation
    lokalisierbare, 408
Transformationsdienst, 412
Transformationsdienst der Ordnung n, 417
Transformationsteam, 407, 414
transformierend, 412
Transition, 92
    ausführende, 337
    delegative, 337

Über-Ich, 163, 168, 176, 179
universelle Turing-Maschine, 28

Variablenbelegung, 302
Verfahren, 365
Verfeinerung, 88, 93, 375

Vergröberung, 87, 88, 93, 374
Verhalten, 112
Verhaltenserwartung, 208
Verhaltensregelmäßigkeit, 203, 352
Verhaltensregelung, 172, 179
Verhaltensverfeinerung, 343
Verhandlungen, 452
vermittelnden Netze, 83
verteilte künstliche Intelligenz, 49
Verzweigungsprozess, 105
Vorbereich, 24, 92
vorgänger-endlich, 104

Wärmetod, 42
Web-Dienste, 58
Wettbewerb, 59
wohlgeformt, 343, 349, 361, 366, 379, 396, 415
wohlgeformte Transformationen, 404
wohltransformierend, 413

Zerlegungseigenschaft, 343
Zugriffsrechte, 384
zugrundliegende Ablaufnetz, 308
Zustandsraumanalyse, 325