

Martin Brahmer-Lohss<sup>1</sup>, Arnim von Gleich<sup>2</sup>, Manuel Gottschick<sup>3</sup>, Helmut Horn<sup>4</sup>,  
Dirk Jepsen<sup>5</sup>, Silke Kracht<sup>2</sup>, Holger Krämer<sup>1</sup>, Antonia Reihlen<sup>5</sup>, Arno Rolf<sup>3</sup>,  
Knut Sander<sup>5</sup>

# **Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg**

## Grundlagen und Vorgehensweise

Zwischenbericht des BMBF-Projektes:

Effizienzgewinne durch Kooperation bei der  
Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg.

Regionale Ansätze nachhaltigen Wirtschaftens  
am Beispiel der Metall- und Metallnebenstoffströme

Hamburg, im Mai 2000

- 
- 1 SUmBi - Ingenieurbüro für Sozial- und UmweltBilanzen
  - 2 Fachhochschule Hamburg, Fachbereich Maschinenbau und Produktion
  - 3 Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik
  - 4 Fachhochschule Hamburg, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
  - 5 Ökopol - Institut für Ökologie und Politik

## **Kontakt:**

Prof. Dr. Arnim von Gleich

Fachhochschule Hamburg

Berliner Tor 21

20099 Hamburg

Telefon: (040) 428 59 - 4345 (- 4279)

email: [gleich@rzbt.fh-hamburg.de](mailto:gleich@rzbt.fh-hamburg.de)

[www.nachhaltige-metallwirtschaft.de](http://www.nachhaltige-metallwirtschaft.de)

Erschienen als Fachbereichs Mitteilung 2 9 6 der Informatik, Universität Hamburg

FB-HH-M-296/00, Juni 2000.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>5</b>
1.1 Einführung.....	5
1.2 Projektorganisation und Außendarstellung.....	7
1.2.1 <i>Projektpartner.....</i>	<i>7</i>
1.2.2 <i>Projektorganisation und Kommunikation.....</i>	<i>7</i>
1.2.3 <i>Informationstechnische Unterstützung.....</i>	<i>8</i>

## I. Grundlagen

<b>2 Nachhaltigkeit .....</b>	<b>10</b>
2.1 Nachhaltigkeitsstrategien .....	10
2.1.1 <i>Nachhaltiges Wirtschaften – Begriffsklärung.....</i>	<i>10</i>
2.1.2 <i>Der Umgang mit den Stoffen in der Technosphäre – Stoffstrommanagement.....</i>	<i>11</i>
2.1.3 <i>Nachhaltigkeit als langfristige Modernisierungsstrategie.....</i>	<i>14</i>
2.1.4 <i>Inner- und zwischenbetriebliches Stoffstrommanagement.....</i>	<i>16</i>
2.2 Richtungssicherheit durch Nachhaltigkeitskriterien.....	17
2.2.1 <i>Was sind Kriterien und welche Anforderungen sind an sie zu stellen?...18</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Vier Ebenen von Nachhaltigkeitskriterien.....</i>	<i>20</i>
2.2.3 <i>Vorsorgeorientierte Technik- und Stoffbewertungskriterien.....</i>	<i>32</i>
<b>3 Wirtschaftsregion Hamburg.....</b>	<b>45</b>
3.1 Charakterisierung der Region.....	45
3.2 Wirtschaftliche Entwicklung in Hamburg.....	46
3.3 Maschinenbau und Metallerzeugung.....	49

## II. Vorgehensweise

<b>4 Wissenschaftliche Herangehensweise/Zugänge.....</b>	<b>52</b>
4.1 Ausgangssituation .....	52
4.1.1 <i>Forschungs- und/oder Umsetzungsprojekt.....</i>	<i>52</i>
4.1.2 <i>Theoriebildung und praxisnahe Teilprojekte.....</i>	<i>52</i>

<b>4.2 Zugänge.....</b>	<b>53</b>
4.2.1 <i>Thematischer Zugang.....</i>	<i>53</i>
4.2.2 <i>Betrieblicher Zugang.....</i>	<i>55</i>
<b>4.3 Erfolgskriterien.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4 Stoffstrommodellierung mit Umberto.....</b>	<b>60</b>
4.4.1 <i>Grundlagen der Modellbildung.....</i>	<i>60</i>
4.4.2 <i>Stoffstromanalysen/-bilanzen.....</i>	<i>62</i>
4.4.3 <i>Die Stoffstromnetzmethode.....</i>	<i>63</i>
4.4.4 <i>Auswertung.....</i>	<i>64</i>
<b>5 Umsetzungsprojekte .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Stoffstromorientierte Ansätze.....</b>	<b>66</b>
5.1.1 <i>Kupfer.....</i>	<i>66</i>
5.1.2 <i>Stahl.....</i>	<i>71</i>
5.1.3 <i>Problemstellung und Ansätze für einen nachhaltigen Stahlkreislauf.....</i>	<i>82</i>
5.1.4 <i>Regionale Akteure in der Stoffkette.....</i>	<i>84</i>
5.1.5 <i>Inputorientierte Ansätze der Entfrachtung des Stahlkreislaufs von                 Störelementen am Beispiel des Kupfers in Autos.....</i>	<i>84</i>
5.1.6 <i>Inputorientierte Strategie zur optimierten Nutzung von Rohstoffen                 am Beispiel der Legierungsmetalle im Edelstahl.....</i>	<i>87</i>
5.1.7 <i>Outputorientierte Ansätze am Beispiel Stahldrähte.....</i>	<i>87</i>
<b>5.2 Prozessorientierte Ansätze.....</b>	<b>88</b>
5.2.1 <i>Schleifschlammrecycling.....</i>	<i>88</i>
5.2.2 <i>Strahlmittelabfälle.....</i>	<i>90</i>
5.2.3 <i>Optimierte Kühlschmierung bei der Metallbearbeitung.....</i>	<i>91</i>
<b>5.3 Produktorientierte Ansätze.....</b>	<b>94</b>
5.3.1 <i>Ökonomische Ausgangslage - treibende oder hemmende Grundlage.....</i>	<i>94</i>
5.3.2 <i>Nachhaltigkeitsorientierte Produkt(ions)strategien.....</i>	<i>94</i>
<b>6 Zusammenfassung.....</b>	<b>98</b>
6.1 <i>Ausblick.....</i>	<i>100</i>
6.2 <i>Erstes Fazit .....</i>	<i>101</i>
<b>7 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>102</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Werte im technischen Handeln (nach VDI-Richtlinie 3780).....	23
Abb. 2: Zauberscheiben der Nachhaltigkeit.....	24
Abb. 3: Vorschlag für einzubeziehende Wirkungen im Rahmen einer Wirkungsbilanz.....	27
Abb. 4: An Tragekapazitäten orientierte Kriterien.....	28
Abb. 5: Entropische Effizienz – Das Beispiel Aluminium.....	36
Abb. 6: Risikotechnologien.....	39
Abb. 7: Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS).....	47
Abb. 8: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte, Juni 1998.....	48
Abb. 9: Betriebsgrößenstruktur in Hamburg im Vergleich.....	49
Abb. 10: Projektaufbau .....	53
Abb. 11: Ein einfaches Stoffstromnetz.....	63
Abb. 12: Hierarchisierung von Stoffstromnetzen.....	64
Abb. 13: Sankeydiagramm.....	65
Abb. 14: KEA und Materialverbrauch Kupfer .....	68
Abb. 15: Produkte der deutschen Stahlindustrie.....	74
Abb. 16: Rohstoffeinsatz für die Rohstahlerzeugung.....	74
Abb. 17: Verbrauchsbereiche von Stahl in der Europäischen Union.....	76
Abb. 18: Stahlverbrauch Welt.....	76
Abb. 19: KEA und Materialverbrauch Oxygenstahl und Elektro Stahl.....	77
Abb. 20: RSH-Stahl, Verbrauch Welt.....	78
Abb. 21: KEA und Materialverbrauch Chrom.....	79
Abb. 22: Kumulierter Energieaufwand und Materialintensität Ferronickel.....	82
Abb. 23: Senken im Stahlkreislauf.....	83

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Bewertungskriterien.....	59
Tab. 2: Abbauwürdige Kupfervorkommen und Bergwerksproduktion nach Ländern.....	66
Tab. 3: Material- und Energieverbräuche für die Herstellung von Kupfer.....	68
Tab. 4: Lagerstätten der abbauwürdigen Eisenerze.....	72
Tab. 5: Erzeugung von Roheisen und Sinter in Deutschland 1998.....	73
Tab. 6: Rohstahlproduktion 1998 .....	73
Tab. 7: Stahlherstellung nach Verfahren und Schrottquoten in ausgewählten Ländern der EU 1998.....	75
Tab. 8: Eigenschaften der wichtigsten RSH-Stahlgruppen.....	77
Tab. 9: Abbauwürdige Chromitierzreserven und Bergwerksproduktion 1997.....	79
Tab. 10: Vorkommen und Bergwerksproduktion von Nickel (1997).....	80
Tab. 11: Anwendungsfelder von Kupfer in Fahrzeugen.....	85
Tab. 12: Verschiedene Elektromotoren im Fahrzeug.....	86

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung

Im Fokus des vom BMBF im Rahmen des Programms ‚Modellprojekte für nachhaltiges Wirtschaften‘ geförderten Forschungsvorhabens „Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg“ steht das Ziel einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ am Beispiel der Wirtschaftsregion Hamburg. Bei den Metallen bilden Eisen und Stahl (inkl. Nickel und Chrom) sowie Kupfer (und voraussichtlich noch Aluminium) den Betrachtungsschwerpunkt, was auch (abgesehen vom Gold) der wertmäßigen Rangfolge bei der Produktion und Verwendung metallischer Rohstoffe in der westlichen Welt entspricht. Der Bogen wird dabei gespannt von der Metallproduktion über die Produktherstellung, Produktverwendung bis hin zur Demontage und zum Metallrecycling. Da die Vielfältigkeit der Metallprodukte und –materialien kaum überschaubar ist, werden in diesem Projekt nur einige Metallströme und Produktgruppen exemplarisch bearbeitet.

Drei Sichtweisen sind für das Projekt charakteristisch:

1. Der Blick auf Metallstoffströme und den gesamten Produktlebenszyklus
2. Der Blick auf die Akteure in der Metallkette und hier insbesondere auf Unternehmen
3. Der Blick auf die Region Hamburg

Ziel ist die nachhaltigkeitsorientierte Optimierung von Stoffströmen (Produkten und Prozessen), wobei dieses Ziel nur zu einem Teil innerhalb der Region Hamburg verfolgt werden kann. Die Region betrachten wir hauptsächlich als ‚Akteursraum‘, in dem wesentliche Akteure der Metallkette agieren mit z. T. weit über die Region hinaus reichenden Wirkungen. Die räumliche Nähe ist allerdings auch für solche weitreichenden Wirkungen von großer Bedeutung. Face-to-Face-Kommunikation und das Aufbauen von Vertrauensbeziehungen sind wesentliche Elemente funktionierender Innovationssysteme. Insofern sind auch ‚Global Player‘ - zu denen z. B. die Norddeutsche Affinerie als Europas größte Kupferhütte ohne Zweifel gehört - fest in regionale Strukturen eingebunden.

Die verschiedenen Blickwinkel auf die Thematik werden im vorliegenden Bericht näher erläutert. Der Bericht gliedert sich dabei im wesentlichen in zwei Teile: Im ersten Teil liegt der Schwerpunkt auf der eher theoretischen Betrachtung mit Fokus auf Nachhaltigkeitsstrategien und Kriterien zur Bewertung von Innovationen. Der zweite Teil des Berichtes konzentriert sich auf die Vorstellung der praxisorientierten Umsetzungsprojekte. Hier liegt der Schwerpunkt bei den Metallnebenstoffströmen (Vermeidung von Kühlschmierstoffen und verbessertes Recycling von Strahlmittelabfällen), bei der Optimierung des Metallrecyclings (Verbesserung des Erfassungsgrades der Metalle und Vermeidung von Störstoffen) und bei nachhaltigkeitsorientierten Produktstrategien (Nutzungsintensivierung, Modulbauweise, Plattformstrategie, recyclinggerechtes Konstruieren, Anlagen- und Komponentenrecycling).

Mit dem vorliegenden Bericht versuchen wir insbesondere auf die folgenden für das Projekt grundlegenden Fragen einzugehen :

- Was verstehen wir unter Nachhaltigkeit? Welche Umsetzungsstrategien werden derzeit verfolgt? Welche Strategien sind auf dem Weg in Richtung Nachhaltigkeit speziell für Kooperationen mit Unternehmen besonders vielversprechend?

- Welche Rolle sollen oder können Metalle als Werkstoffe in einer nachhaltigen Wirtschaftsweise spielen? Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, wenn sie dort neben den nachwachsenden Rohstoffen eine tragende Rolle spielen sollen?
- Was sind die konstitutiven Merkmale der Innovationsfähigkeit von Unternehmen bzw. von unternehmensübergreifenden Innovationssystemen? Welche charakteristischen Merkmale der Region Hamburg beeinflussen die Innovationssysteme der hamburgischen Metallwirtschaft?
- Mit welchem Kriterienraster lassen sich Innovationen richtungssicher hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitswirkungen bewerten?
- Anhand welcher Kriterien wurden die Teilprojekte ausgewählt? Welche ggf. übertragbaren Erfahrungen wurden dabei gemacht?
- Welche erfolgversprechenden Umsetzungsprojekte wurden in der bisherigen Zeit angegangen? Wie sind sie zustande gekommen?
- Welche Rolle können und werden die Instrumente der Stoffstrommodellierung und des Stoffstrommanagements dabei spielen?

Die theoretischen und praktischen Ebenen werden und wurden parallel bearbeitet. Durch den sehr zeitintensiven und dadurch gegenüber der ursprünglichen Projektplanung etwas verzögerten Aufbau der Unternehmenskontakte lag der Bearbeitungsschwerpunkt zuerst in der theoretischen und konzeptionellen Bearbeitung.

Das Kapitel 2 zum Thema "Nachhaltigkeit" zeigt den Stand der Diskussion innerhalb der wissenschaftlichen Projektpartner zu Nachhaltigkeitsstrategien und -kriterien. Im Kapitel 3 wird – auf dem derzeitigen Projektstand noch sehr kurz – die Region Hamburg und die Metallwirtschaft der Region vorgestellt. Im 4. Kapitel werden die wissenschaftlichen und praktischen Herangehensweisen (Zugänge) an das Thema Nachhaltige Metallwirtschaft beschrieben. Die bisher bearbeiteten Praxisprojekte werden im 5. Kapitel dargestellt. Bei den Metallstoffströmen Stahl und Kupfer und den nachhaltigkeitsorientierten Produktstrategien dominiert derzeit auch hier noch die eher konzeptionelle Bearbeitung, während bei den prozessorientierten Zugängen (Schleifschlamm, Strahlmittelabfälle, Trockenbearbeitung) die praxisorientierte Umsetzung im Vordergrund steht.

Zum Schluss dieser Einleitung noch ein paar Worte zu Form und Umfang dieses ‚Zwischenberichts‘. Die Projektgruppe hat den Zwischenbericht als ‚Meilenstein‘ betrachtet und zum Anlass genommen, die verschiedenen theoretischen und praktischen Arbeitsfelder innerhalb des Projektes zusammen zu führen, um eine gemeinsame Ausgangsbasis für die zweite Hälfte der Projektlaufzeit zu schaffen. Wir hoffen, dass die potentiellen Leserinnen und Leser durch den Umfang des Berichts nicht allzu sehr abgeschreckt werden, sondern im Gegenteil, dass sie die ihnen wichtig erscheinenden Abschnitte lesen und dabei auch "Appetit-auf-mehr" bekommen ...

Bevor jedoch auf die Inhalte des Forschungsvorhabens näher eingegangen wird, sollen im folgenden Abschnitt dieser Einleitung die interne Projektorganisation und die Kommunikation zwischen den wissenschaftlichen Projektpartnern dargestellt werden.



## **1.2 Projektorganisation und Außendarstellung**

### **1.2.1 Projektpartner**

Das Forschungsprojekt ist als interdisziplinäres Projekt angelegt, was bedeutet, dass Projektpartner aus verschiedenen Arbeitsgebieten und Organisationen sich verständigen und zusammen arbeiten müssen.

Den Kern des Projektes bilden die Wissenschaftspartner. Dieses sind aus dem Hochschulbereich die Fachhochschule Hamburg (Fachbereich Maschinenbau und Produktion, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik) und die Universität Hamburg (Fachbereich Informatik, Arbeitsbereich Angewandte und Sozialorientierte Informatik), weiterhin sind das Institut für Ökologie und Politik - Ökopol - und das Ingenieurbüro für Sozial- und Umweltbilanzen - SUmBi - an dem wissenschaftlichen Verbund beteiligt. Die Zusammenarbeit zwischen den wissenschaftlichen Projektpartnern hat sich während des ersten Jahres gefestigt.

Auf der Seite der Praxispartner sind zum einen die Unternehmen (u.a. Norddeutsche Affinerie, Jungheinrich, Fette, Bauermeister), aber auch Vertreter von Verbänden und Behörden sind an dem Projekt beteiligt.

Im Einzelnen wurden die wissenschaftlichen Projektteilnehmer bereits im Antrag vorgestellt - an dieser Stelle soll deshalb darauf verzichtet werden. Die am Projekt beteiligten Unternehmen sind hauptsächlich über die im zweiten Teil beschriebenen Umsetzungs-/Teilprojekte in das Projekt eingebunden und werden dort bei Bedarf kurz vorgestellt.

Die Anzahl der am Projekt beteiligten Unternehmen nimmt im Projektverlauf weiter zu. Einige Themen werden derzeit sehr intensiv mit einem Unternehmen erarbeitet, um danach das Thema in einem zweiten Schritt einem größeren Teilnehmerkreis z.B. im Rahmen von Workshops vorzustellen. Auf dieser Basis werden dann evtl. weitere Unternehmen in das Projekt eingebunden.

Dabei sehen wir die Partnerunternehmen als Kompetenz-Träger, die zum einen ihr Wissen einbringen und gemeinsam erweitern, zum anderen aber auch ihre Bedarfe anmelden, um die vorhandenen Kenntnisse zu erweitern.

Die Aufgabe der wissenschaftlichen Partner ist es, den Transfer im Sinne der Antragstellung herzustellen und zu moderieren. Dieser Transfer erfolgt sowohl horizontal, d.h. zwischen den verschiedenen Unternehmen in die Region hinein, als auch vertikal entlang der Wertschöpfungskette. Ein weiterer Schwerpunkt der wissenschaftlichen Partner ist es, das Thema „Metalle“ bzw. „Nachhaltige Metallwirtschaft“ in der Nachhaltigkeitsdebatte zu positionieren.

### **1.2.2 Projektorganisation und Kommunikation**

Die heterogene Zusammensetzung des Projekts erfordert einen relativ hohen Aufwand an Organisation und Kommunikation. Dieser Aufwand wurde bei der Antragstellung unterschätzt, so dass zumindest bisher mehr Zeit als geplant in die Projektkommunikation und -organisation sowohl zwischen den Wissenschaftspartnern als auch insbesondere in den Aufbau der Unternehmenskontakte geflossen ist.

An der Fachhochschule Hamburg wurde wie geplant ein Koordinationsbüro eingerichtet. Das Büro ist mit einer halben Stelle besetzt. Diese Einrichtung hat sich als zentrale Anlaufstelle sowohl nach „innen“ als auch nach „außen“ bewährt.

Ein Arbeitsbereich des Koordinationsbüros ist die Öffentlichkeitsarbeit. Dazu gehört die Darstellung des Projektes im Internet ([www.nachhaltige-metallwirtschaft.de](http://www.nachhaltige-metallwirtschaft.de)), aber auch der Aufbau von Pressekontakten, um das Projekt in der Region Hamburg bekannt zu machen.

Ca. alle 4 Wochen finden **Projektgruppentreffen** statt, Teilnehmer sind die Projektarbeiter der Wissenschaftspartner sowie die Projektleitung und das Koordinationsbüro. Diese Projektgruppe bestimmt die inhaltliche Ausrichtung (kurz und mittelfristig) des Projektes, tauscht aber auch Informationen aus, damit die Projektbeteiligten einen Überblick über das gesamte Projektgeschehen bekommen und eine Vernetzung der verschiedenen Arbeitsfelder möglich ist.

Im Abstand von ca. 3 Monaten finden Treffen der **Steuerungsgruppe** statt. Die Teilnehmeranzahl ist wesentlich geringer - nur jeweils ein Vertreter von Ökopol, SUmBi, Universität und Fachhochschule nehmen teil. Im Unterschied zur Projektgruppe erfolgt in der Steuerungsgruppe die mittel- und langfristige Ausrichtung des Projektes. Außerdem nimmt die Steuerungsgruppe vorwiegend Controlling-Aufgaben wahr (Finanz- und Ergebniscontrolling, Grobplanung von Workshops, Definition von Meilensteinen etc.).

Um die Einbindung und Verankerung des Projektes in der Region Hamburg und den Transfer der Projektergebnisse zu fördern, wurde ein Projektbeirat gegründet, der mit hochrangigen Vertretern verschiedener Hamburger Institutionen besetzt ist, und einmal pro Jahr tagt. Neben dem Umweltsenator sind dies die für Forschung zuständigen Präsidenten und Vizepräsidenten der Hochschulen, die Geschäftsführer der Handelskammer und des ZEWU der Handwerkskammer sowie Vertreter des VDMA und von Nordmetall. Wir erhoffen uns von den Mitgliedern des Projektbeirates, dass auch nach Beendigung des Projektes die Ergebnisse auf einer breiten Basis diskutiert werden und das „Geschehen in der Region“ nachhaltig beeinflussen.

Darüber hinaus bestehen regelmäßige Kontakte zu den anderen regionalen Stoffstrommanagementprojekten, die vom BMBF gefördert werden. In diesem Rahmen wurde bisher v.a. an übergreifenden Fragestellungen gearbeitet, die auf gemeinsamen Veranstaltungen und Workshops diskutiert wurden und werden. Die Kooperation mit den anderen Stoffstrommanagementprojekten im Programm ist sehr vielversprechend. Der erste Workshop fand Ende Februar in Heidelberg statt, den zweiten zu EDV-Tools und Modellierung werden wir in Hamburg am 16./17. 5. dieses Jahres ausrichten.

### 1.2.3 Informationstechnische Unterstützung

Um die Kommunikation und den Informationsaustausch zwischen allen Projektbeteiligten sicher zustellen, wird stark mit Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) gearbeitet. Wir greifen dabei insbesondere auf die Erfahrungen und Vorarbeiten des FB Informatik der Universität Hamburg zurück.

Vorrangig wird Email zur elektronischen Kommunikation und zum Austausch von Dateien genutzt. Diese Technik war bei allen Beteiligten bekannt und hatte sich daher bewährt. Wie oben erwähnt, ist das Projekt durch die Eigenständigkeit der Beteiligten geprägt. Ziel einer IuK-Unterstützung war es, die vorhandenen und neu erarbeiteten Informationen so zu archivieren und bereitzustellen, dass alle Beteiligten sowohl eigenständig Informationen der Wissensbasis zufügen als auch in dem Wissenspool recherchieren können. Weiterhin sollte die gemeinsame Bearbeitung von Textdokumenten möglich sein.

Es wurden daher verschiedene Groupware, Informations-, Dokumenten- und Wissensmanagementprogramme auf die Erfüllung dieser Anforderungen geprüft. In die engere Wahl kamen dabei die Programme Lotus Notes, Gauß VIP und Hyperwave. Ausgewählt

wurde der Hyperwave Informationserver, da er über bekannte und überall verfügbare WWW-Browser genutzt werden kann, eine einfache und im großen Maße selbstorganisierte Administration bietet und für Hochschulen zur Forschungsunterstützung kostenlos zur Verfügung gestellt wird.

Nutzbar ist unser Server über die oben erwähnte WWW-Schnittstelle oder über die Clientsoftware „Virtual Folders“, mit der der Server wie ein Netzlaufwerk unter MS-Windows genutzt werden kann. Eine einfache Bedienung zum Up- und Download von Dateien ist damit sicher gestellt. Recherchiert werden kann in den abgelegten Dokumenten durch eine komfortable Suchmaschine über die WWW-Schnittstelle. Stichworte werden dabei in allen Dokumenten der Formate DOC, RTF, PDF, HTML und TXT gesucht, indem beim Upload eine Indizierung vorgenommen wird. Obwohl auch eine gemeinsame Bearbeitung von Dokumenten und die Nutzung von Diskussionsforen technisch möglich ist und angestrebt wird, wird der Server derzeit hauptsächlich zur Archivierung von Dokumenten genutzt. Manche Projektpartner haben den Server noch nicht als Arbeitsmedium für sich entdecken können, was aber im weiteren Projektverlauf und mit neuen Schulungsangeboten erreicht werden soll.

Eine weitere Anforderung an unterstützende IuK-Technologie war der Wunsch nach einer zentralen Literaturdatenbank. In einem umfangreichen Auswahlverfahren wurde am FB Informatik die Software Biblioscape ausgewählt. Da durch diese Software auch die Anforderungen dieses Projektes erfüllt werden, wird auch hier Biblioscape als Literaturdatenbank verwendet. Die besonderen Features sind die Kompatibilität mit allen textverarbeitenden Programmen, die gleichzeitige Nutzung und Bearbeitung einer Datenbasis von mehreren Anwendern und die Möglichkeit, auf die Datenbank über eine WWW-Schnittstelle lesend und schreibend zu zugreifen.

Zur Unterstützung des Projektmanagements wird MS-Project zur Planung, graphischen Darstellung und zum Teammanagement eingesetzt. Ressourcenplanung und evtl. Kostenbe- und abrechnung sind vorgesehen, falls es sich als effektiv erweisen sollte. Ziel bei der Verwendung von MS-Project ist die Verbesserung der Übersicht über die gesamten Aktivitäten im Projekt und eine Abschätzung der Kapazitäten, ohne dass der Aufwand für die Pflege der Daten den Nutzen übersteigt. Unter ca. 20 verglichenen Projektmanagementprogrammen wurden fünf in eine engere Auswahl genommen, von denen zwei (A-Plan und MS-Project) praktisch erprobt wurden. Ausgewählt wurde MS-Project wegen der Möglichkeit, per Email Aktualisierungen halbautomatisch bei den Partnern zu erfragen und deren Änderungen automatisiert zu übernehmen.

# I. Grundlagen

## 2 Nachhaltigkeit

### 2.1 Nachhaltigkeitsstrategien

#### 2.1.1 Nachhaltiges Wirtschaften – Begriffsklärung

Nachhaltigkeit ist eine dreidimensionale Zielperspektive, bei der es um ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit geht.

Mindestens zwei neue Qualitäten sind durch den Nachhaltigkeitsdiskurs in die öffentliche Debatte eingebracht worden:

1. Ausgehend vom Gedanken der Gerechtigkeit, nicht nur zwischen heute lebenden, sondern auch gegenüber zukünftig lebenden Generationen, ergibt sich eine Langfristorientierung für relevante Handlungsbereiche. Hinzu kommt eine globale Orientierung in der Rolle der ökonomischen Globalisierung und der Umweltprobleme, die inzwischen globale Ausmaße angenommen haben. Zusammengenommen bedeutet dies eine **gewaltige Erweiterung des räumlichen und zeitlichen Horizonts unserer Problemwahrnehmung** (inkl. der entsprechend weitreichenden Anforderungen an unsere Problemlösungskapazitäten).
2. Die vom Gedanken einer inter- und intragenerationellen Gerechtigkeit getragene **Integration der drei Zielperspektiven** - soziale, ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit - stellt einen bedeutenden Orientierungswandel gegenüber der bisherigen Branchenorientierung in der Wirtschaft, der Ressortorientierung in der Politik und der disziplinären Orientierung in der Wissenschaft dar. Dies ist einerseits sicher ein großer Fortschritt, andererseits sind diese drei Zielperspektiven aber auch mit hohen Anforderungen an unsere Kapazitäten zur Komplexitätsbewältigung und unsere Integrationsfähigkeiten verbunden.

Das Nachhaltigkeitsziel kann offensiv oder defensiv angegangen werden. Defensiv läßt sich entsprechend folgendes formulieren:

**Nachhaltig kann ein Weg in die Zukunft nur dann sein, wenn er weitreichende Systemzusammenbrüche in den ökologischen, ökonomischen und sozialen Systemen vermeidet.** Nicht-Nachhaltigkeit ist somit leichter zu bestimmen als Nachhaltigkeit.

Insbesondere die stofflichen Austauschbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur sind jedoch schon seit geraumer Zeit sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite in die Krise geraten.

Die Begrenztheit der Aufnahmekapazität der Natur für unsere Abfälle und Emissionen wurde angesichts drohender Klimakatastrophe und Eutrophierung ganzer Weltmeere inzwischen auch auf globalem Niveau deutlich. Auch der Boden speichert mit seinem 'Langzeitgedächtnis' unsere Umweltsünden auf lange Zeit.

Auf der Inputseite ist klar, dass die nicht-regenerierbaren mineralischen Ressourcen der Erde endlich sind. Zwar ist ein solches Ende als absolute Marge nicht in Sicht, bzw. schwer bestimmbar (seit 50 Jahren reichen die Erdöl- oder die Kupferressourcen noch für ca. 50 Jahre), aber es wird auf verschiedenen Gebieten (gerade auch bei Metallen wie Kupfer und Nickel) deutlich, dass wir schon heute gezwungen sind, immer 'magerere'

Lagerstätten mit immer größerem materiellen und energetischen Aufwand auszubeuten. Nicht das schlichte Vorhandensein (bzw. Nichtvorhandensein) der Ressourcen, sondern ihre Konzentration bzw. der ökonomische und insbesondere der ökologische Aufwand für ihre Gewinnung sind die entscheidenden limitierenden Faktoren.

Anknüpfend an den auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio 1992 vom ‚World Business-Council for Sustainable Development‘ vorgestellten sowie von der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestags konkretisierten Managementregeln gilt es also:

1. Auf regenerierbare Ressourcen (Sonnenenergie und Nachwachsende Rohstoffe) überzugehen, wo immer es möglich ist,
2. diese Ressourcen nachhaltig, d. h. unterhalb ihrer Regenerationsrate zu nutzen,
3. die nicht-regenerierbaren Ressourcen mit einem Höchstmaß an Ressourceneffizienz zu nutzen (z. B. eine lang anhaltende Nutzung und hochwertiges Recycling anzustreben) und nach regenerierbaren Substituten Ausschau zu halten,
4. die Aufnahmekapazitäten der Reststoffsinken nicht überzubeanspruchen,
5. keine extremen technischen Risiken für Mensch und Natur zuzulassen<sup>1</sup>.

Mit Blick auf die stofflichen Austauschbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur geht es also nicht nur um den Übergang von der linearen Durchflusswirtschaft zur nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, sondern um nichts weniger als die (Wieder-) **Einbettung des gesellschaftlichen Stoffwechsels in den Naturhaushalt**. Und das Ganze, ohne dabei extreme technische bzw. (öko-) toxikologische Risiken aufzubauen und ohne auf diesem Weg die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft und den sozialen Zusammenhalt zu gefährden.

## 2.1.2 Der Umgang mit den Stoffen in der Technosphäre – Stoffstrommanagement

Ein ganz wesentlicher Schlüssel für den Umbau unseres Wirtschaftens in Richtung Nachhaltigkeit liegt allerdings - selbst bei einer vornehmlich stofflichen Betrachtung - weder in der Rohstoff- noch in der Abfallwirtschaft. Um ihn zu finden, müssen wir den Blick wegwenden von den Schnittstellen zwischen Öko- und Technosphäre, hin zum Umgang mit den Stoffen in der Technosphäre. Dies ist der Kerngedanke von Strategien, die heute mit Begriffen wie ‚integrierter Umweltschutz‘, ‚Steigerung der Ressourceneffizienz‘ und ‚Stoffstrommanagement‘ bezeichnet werden.

---

<sup>1</sup> Vgl. Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt: Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung, (Zur Sache 4/98), Bonn 1998

### **2.1.2.1 Metalle und Nachwachsende Rohstoffe als materielle Basis nachhaltigen Wirtschaftens**

Metalle spielen schon in unserem derzeitigen Wirtschaften eine große Rolle. Obwohl sie zu den nicht-regenerierbaren Ressourcen gehören, werden Metalle auch in einer ‚Nachhaltigen Stoffwirtschaft‘ eine große Bedeutung haben. Sie bieten aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften ideale Voraussetzungen für eine lange Nutzungsdauer, für eine gute Reparierbarkeit und Modernisierbarkeit von Produkten und für ein Recycling auf gleichem Ordnungs- und Wertniveau. Im Prinzip ist eine ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ denkbar, in der die Metalle in der Technosphäre kreisen, während sich die Gewinnung von Frischware nur noch auf den Ausgleich der unvermeidbaren dissipativen Verluste beschränkt (z. B. durch Korrosion, Abbrand oder unvertretbar hohen Aufwand fürs Recycling).

Metalle bieten somit die Möglichkeit, dass sich der z. T. sehr hohe Aufwand für ihre Gewinnung und Erzeugung im Rahmen einer effizienten und produktiven Nutzung nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch ‚amortisiert‘.

Das Ziel der ökonomischen und ökologischen Amortisation (z. B. durch lange Nutzungsdauer und Recycelbarkeit auf hohem Niveau erreichbar) gilt im übrigen für nicht-regenerierbare und nachwachsende (Roh-)Stoffe gleichermaßen. Jedoch haben nachwachsende Rohstoffe im Vergleich zu Metallen den Vorteil, dass sie - durch die Produktivität land- bzw. forstwirtschaftlicher Nutzflächen in begrenzter Menge - immerhin langfristig und dauerhaft zur Verfügung stehen. Hinzu kommt der oft wesentlich geringere Aufwand für ihre Gewinnung. Zum dritten können sie nach der Nutzungsphase in der Regel recht gut wieder in die biologischen Kreisläufe integriert werden (biologische Abbaubarkeit, Humusbildung). Bei nachwachsenden Rohstoffen, die im Rahmen des Projekts am ehesten in den Metallnebenstoffströmen, z. B. beim Ersatz problematischer Hilfsstoffe in den Bereichen Entfettung, Schmierstoffe und Beschichtungen, eine Rolle spielen können, gibt es allerdings aufgrund dieser Eigenschaften auch oft Probleme mit der Haltbarkeit und mit einem hochwertigen Recycling.

### **2.1.2.2 Ökologische, ökonomische und soziale Amortisation**

Nachdem gerade in der Vergangenheit auch metallische Werkstoffe wie z. B. das Aluminium im Zentrum einer ökologisch motivierten Kritik gestanden haben, wegen des mit ihrer Herstellung verbundenen extremen ökologischen Aufwandes, dürfte es nicht ohne weiteres nachvollziehbar sein, warum in diesem Forschungsprojekt die Werkstoffgruppe der Metalle im Rahmen einer Nachhaltigkeitstrategie ausgewählt wurde. Doch auch die Kritik am Aluminium hat sich immer schon am Aufwand-Nutzen-Verhältnis entzündet, gerade dort, wo Aluminium nur relativ kurzfristig und oft auch kaum recycelbar als Verpackungsmaterial eingesetzt wurde. Entscheidend ist also nicht nur der Aufwand für die Primärherstellung, sondern das Aufwand-Nutzen-Verhältnis. Hierfür fehlt derzeit noch ein geeignetes Maß.

Bei einer theoretischen Betrachtung für den Bereich der Energie zeigt sich, dass in einigen Gebieten weiterreichende Ansätze schon geläufig sind. So gibt es für das energetische Aufwand-Ertrags-Verhältnis von Energiewandlungsprozessen das Kriterium des ‚Wirkungsgrads‘. Hier kann also der aktuelle technische Stand der Energieumwandlungsprozesse mit dem ‚idealen Carnot-Prozeß‘ verglichen und damit auch die noch brachliegenden, unausgeschöpften Effizienzpotentiale ziemlich klar benannt werden. Das im Bereich der Stoff- und Energieströme derzeit noch dominierende Bewertungsinstrument, die Ökobilanz, orientiert sich dagegen rein buchhalterisch auf die Input-Output-Beziehungen zwischen Techno- und Ökosphäre. Mit ihr richtet sich der Blick noch nicht auf das zentrale Problem, ‚der Umgang mit den Stoffen in der Technosphäre‘.

Der 'Aufwand', den wir für die Gewinnung und Verwertung von (Werk-)Stoffen treiben, soll sich in der Nutzungsphase (also innerhalb der Technosphäre) nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch 'amortisieren'. Wie die ökonomische Amortisation einer Investition aussehen kann, ist bekannt: Das eingesetzte Kapital muß zurückfließen und sich angemessen verzinsen. Wie könnte im Vergleich dazu die 'tendenzielle ökologische Amortisation' des eingesetzten Naturaufwands (Naturkapitals) aussehen? Mit einer 'ökologischen Verzinsung', also einem Surplus an Naturkapital, ist (zumindest bei unserer derzeitigen Form des Umgangs mit Natur) wohl kaum zu rechnen. Möglich und notwendig ist aber eine Maximierung des ökonomischen und ökologischen Nutzens bei gleichzeitiger Minimierung des ökonomischen und ökologischen Aufwandes.

Mit dem Begriff 'tendenzielle ökologische Amortisation' wollen wir deshalb zunächst nur die **tendenzielle Verringerung des ökologischen Aufwandes pro Nutzeneinheit** bezeichnen, die durch Nutzungsverlängerung, durch Erhöhung der Ressourcenproduktivität und durch Recycling auf den verschiedenen Wertstufen erreicht werden kann. Eine tendenzielle ökologische Amortisation kann somit durch eine möglichst 'produktive' Nutzung (lange Nutzungsdauer, Leasing, Mehrfachnutzung, Reparierbarkeit, Multifunktionalität und Modernisierbarkeit von Produkten), durch Erhöhung oder zumindest Beibehaltung des Nutzens bei vermindertem Stoff- und Energieeinsatz (Effizienzgewinne, Erhöhung des Dienstleistungsanteils, Dematerialisierung) und durch ein hochwertiges Produkt-, Komponenten- und Material-Recycling angestrebt und erreicht werden.

Wenn beispielsweise der ökologische Aufwand für das hochwertige Recycling eines Werkstoffs erheblich kleiner ist als der Aufwand für seine Primärherstellung, wie es beim Aluminium zumindest im Prinzip der Fall sein kann, dann steigt zwar mit jedem Recyclingzyklus der insgesamt mit diesem Werkstoff verbundene Umweltaufwand, bezogen auf den einzelnen Nutzungs- bzw. Recyclingzyklus wird er jedoch mit jedem Umlauf proportional kleiner. Der im Vergleich zu anderen Werkstoffen erheblich größere Aufwand für die Primärherstellung von Aluminium kann sich auf diese Weise 'tendenziell ökologisch amortisieren'.

Im Sinne der dreidimensionalen Zielsetzung des "Nachhaltigkeits-Projektes" ist aber auch die soziale Komponente gleichrangig neben Ökonomie und Ökologie gestellt. Soziale Nachhaltigkeit umfaßte in der Nachhaltigkeitsdebatte von Anfang an die beiden Gerechtigkeitsdimensionen: Gerechtigkeit zwischen heute lebenden Generationen, insbesondere in den Industrieländern und in den Ländern der sog. Dritten Welt, sowie Gerechtigkeit zwischen heute lebenden und zukünftig lebenden Generationen. Letzteres ist gerade bei der Nutzung von nicht-regenerierbaren Ressourcen von besonderer Relevanz. Auch in dieser Dimension ist somit eine "soziale Amortisation" der Inanspruchnahme der Naturressourcen anzustreben. Darüber hinaus geht es bei der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit aber auch um die von der Völkergemeinschaft benannten Menschenrechte, um Freiheit und Selbstbestimmung. Angesichts der Tatsache, dass derzeit auf ca. 20% der Weltbevölkerung ca. 80% des Verbrauchs an Naturressourcen entfällt, kommt den Wirtschaftsakteuren in den Industrienationen (also Unternehmen und Verbrauchern) eine besondere Verantwortung zu. Gerade die im weltweiten Wettbewerb stehende Grundstoffindustrie und Massenproduktion mit ihrer auf die ökonomische Amortisation ihrer gewaltigen Anlagen-Investitionen ausgerichteten Unternehmenspolitik führt teilweise zu weitreichenden sozialen Folgen, sowohl quantitativer als auch qualitativer Art. Quantitativ insbesondere im Hinblick auf den Rationalisierungsdruck und Arbeitsplatzabbau in den Ländern mit hohem Lohnniveau sowie hohen Sozial- und Umweltstandards, qualitativ eher in den Ländern der Dritten Welt durch die Gefahr eines Lohn- und Umweltdumpings, durch ungesicherte Arbeitsplätze, extrem niedrige Sozial- und Umweltstandards bis hin zu extremen Auswüchsen wie Kinderarbeit.

Durch andere Nutzungs- und Dienstleistungsstrategien, die in den auf der Werkstoffherstellung aufbauenden Stufen der Produktkette die Wertschöpfung auf ein höheres und komplexeres Produkt-/Produktionsniveau verlagern, könnten hier entlastende Effekte erzielt werden. Den Menschen und ihrer Qualifikation und Motivation kommt in der differenzierten Qualitätsproduktion eine besondere Rolle zu, steht doch bei entsprechenden Konzepten der Qualitäts- und Flexibilitätsanspruch deutlich vor der reinen Ausrichtung auf Senkung der Stückkosten.

Qualifikation und Motivation der Mitarbeiter als Träger der Anpassungsfähigkeit der Arbeitssysteme rücken damit in den Kern der unternehmerischen Bemühungen um Wettbewerbsfähigkeit, um ökonomische, soziale und ökologische Nachhaltigkeit. Die Realisierung solcher schönen Bilder von der Aussöhnung der konkurrierenden Anforderungen von Ökonomie, Ökologie und Sozialem ist allerdings u. a. davon abhängig, wie weit die Entkopplung von Umweltaufwand (Stoff- und Energiedurchsatz) und Wertschöpfung in einer fortentwickelten Dienstleistungsgesellschaft tatsächlich möglich ist. Die bisher belegbaren sozialen und ökologischen Entlastungseffekte dieses volkswirtschaftlichen Strukturwandels sind noch nicht sehr weitreichend und womöglich auch nicht einfach extrapolierbar.

### **2.1.3 Nachhaltigkeit als langfristige Modernisierungsstrategie**

Wenn ein ganz wesentlicher Schlüssel für den Umbau unseres Wirtschaftens in Richtung Nachhaltigkeit beim Umgang mit den Stoffen und Produkten in der Technosphäre liegt, resultiert hieraus, dass dieser Umbau nicht vorwiegend eine Angelegenheit des Umweltmanagements, der Umweltpolitik und der 'Umweltspezialisten' in den Unternehmen sein kann. Die Abfall- und Emissionsspezialisten können ihren Beitrag leisten. Dies ist allerdings um so erfolgreicher, je mehr sie zum betrieblichen und überbetrieblichen Stoffstrommanagement entlang der Produktlinie übergehen. Denn nicht erst am Ende des Produktlebenszyklus bzw. beim Management von Abfällen und Emissionen entscheidet sich die Umweltrelevanz von Produkten und Produktionsprozessen. Schon beim Einkauf, beim Design und bei der Erstellung der ‚Pflichtenhefte‘ für Prozesse, Maschinen, Anlagen und Produkte wird sehr weitgehend nicht nur über mögliche Umweltwirkungen und Abfälle, sondern eben auch über nachhaltige Nutzungsmöglichkeiten entschieden. Wichtige Akteure beim Umbau in Richtung Nachhaltigkeit sind also die Konstrukteure, die Logistiker sowie insbesondere die Service- und Vertriebspezialisten mit ihrer Kundenähe. Stoffstrommanagement gehört somit - wenn es schon vorwiegend in *einer* Unternehmensabteilung untergebracht werden soll - eigentlich zu den zentralen Aufgaben der Qualitätssicherung bzw. des Qualitätsmanagements (was im übrigen der schon beobachtbaren tendenziellen Konvergenz von Qualitäts- und Umweltmanagement in den Unternehmen durchaus entspricht).

#### **2.1.3.1 Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Stoffstrommanagement**

Vollzogen werden Schritte in Richtung Nachhaltigkeit von den Unternehmen nur, wenn damit nicht ihre Marktposition untergraben wird. Es spricht allerdings einiges dafür, dass ihre Marktposition auf diesem Wege eher verbessert werden kann, dass die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen - die von sehr viel mehr abhängt, als ‚nur‘ von Herstellungskosten und vom Preis der Produkte - auf der Grundlage einer Verbindung von ökonomischer und ökologisch-sozialer Modernisierung sogar eher zunimmt.

Stoffstrommanagement, Schritte in Richtung auf ein nachhaltigeres Wirtschaften, dürften im Zuge sich weiter verändernder Wettbewerbsbedingungen immer stärker zu wesentlichen Elementen der Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in dyna-



mischen, wettbewerbsintensiven Märkten werden. Mit dem Begriff Globalisierung wird nur ein Aspekt dieser tiefgreifenden Veränderungen auf den Märkten beschrieben. Der Wettbewerb verschärft sich nicht nur quantitativ, weil neue Wettbewerber auftreten, sondern auch qualitativ, weil sich die Märkte und die Nachfrage selbst verändern.

Mit der These vom Übergang von der fordistischen Massen- zur differenzierten Qualitätsproduktion wird versucht, eine mögliche Reaktion der Unternehmen auf diese Vorgänge zu beschreiben. In nicht mehr angebots-, sondern nachfragedominierten, gesättigten Märkten steigt die Macht der Kunden (nicht nur der Endkunden, sondern auch der System-Hersteller gegenüber ihren Zulieferern), die Märkte werden unübersichtlicher, segmentierter und dynamischer. Eine Steigerung der Innovationsfähigkeit, der Flexibilität sowie eine radikale Kundenorientierung gehören zu den überlebensnotwendigen Erfolgsfaktoren. Produktqualität und Wettbewerbsfähigkeit sind damit im wesentlichen *qualitative* Aspekte und wesentlich vielschichtiger als in Mark und Pfennig ausdrückbare Produktpreise oder aktuelle Umsatzzahlen oder Renditen. Die Kunden interessiert **Preis und Leistung** (bzw. Produktqualität) gleichermaßen, und zur Leistung bzw. Produktqualität kann sehr viel gehören, angefangen von Lieferfristen über Garantieleistungen, Service bis hin zur ökologischen und sozialen Performance des Unternehmens.

Wenn zwei Wettbewerber einem Kunden technisch und preislich dasselbe zu bieten in der Lage sind, kann jeder vom Kunden wahrnehmbare 'Zusatznutzen' entscheidend werden, angefangen vom optischen Design, über Markenbewußtsein bis hin zum Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein eines Umweltmanagementsystems (DIN ISO 14000 ff) bzw. einer Validierung nach EG-Öko-Audit oder das Konzept einer 'Total Material Efficiency' (TME). Ein gutes 'Image' ist für ein Unternehmen heute kein Luxus mehr, es ist wesentlicher Teil seiner Wettbewerbsfähigkeit. Nicht zuletzt Unternehmen, die an die Börse gegangen sind, wissen, von wieviel qualitativen Aspekten (bzw. von welchen Informationen über das Unternehmen) der Kurs ihrer Aktien inzwischen beeinflusst wird.

### **2.1.3.2 Ökonomische, ökologische und soziale Modernisierung**

Der strategische Grundansatz des Projekts kann somit folgendermaßen beschrieben werden: Es soll versucht werden, im Rahmen der ohnehin notwendigen Neuorientierungen der Unternehmen, unter den sich verändernden Wettbewerbsbedingungen, den nötigen Umbau in Richtung auf ein nachhaltiges Wirtschaften gleich mit zu bewerkstelligen. Oder anders ausgedrückt: Es spricht einiges dafür, dass heutzutage eine 'funktionale', d. h. eine rein ökonomische Modernisierung der Unternehmen keinen nachhaltigen Erfolg mehr verspricht, wenn sie nicht mit einer 'normativen' bzw. ökologischen und sozialen Modernisierung verbunden wird.

Wir gehen deshalb davon aus, dass die Unternehmen, die als Praxispartner im Rahmen des Projekts kooperieren, sich nicht allein mit den ökonomisch sehr schnell und vordergründig erfah- und kalkulierbaren Effizienzgewinnen begnügen, sondern dass sie einen wesentlich breiteren Modernisierungsansatz verfolgen und sich wirklich am dreidimensionalen Langfristziel 'Nachhaltiges Wirtschaften' orientieren.

### **2.1.3.3 Verbesserung der "home base": Die Region Hamburg als Akteursraum**

'Nachhaltiges Wirtschaften' mit seinen drei Dimensionen ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit ist ein ungeheuer komplexes Ziel. Wenn bei jedem nächsten Schritt immer gleichzeitig die Anforderungen aller drei Dimensionen berücksichtigt werden müssen, besteht schnell die Gefahr, in die 'Komplexitätsfalle' zu tappen und völlig gelähmt, gar keine Schritte mehr zu wagen. Es müssen also Wege (Formen des insti-

tionalisierten Aushandelns) gefunden werden, in denen es möglich ist, dass beim nächsten Schritt eines oder zwei der drei Ziele zunächst zurückstecken können. Dies wird aber nur funktionieren, wenn (institutionell abgesichert) gewährleistet ist, dass diese dann in einem der nächsten Schritte ‚dran‘ sind.

Zum Glück gibt es einige Umsetzungsprojekte, in denen tatsächlich alle drei Dimensionen gleichzeitig und gleichermaßen ‚profitieren‘. Es ist dies einerseits die Steigerung der **Ressourceneffizienz**. Wenn wir es schaffen, die gleiche Dienstleistung, das gleiche Produkt mit weniger Kapital- und Naturaufwand bereitzustellen, dann ‚profitieren‘ davon alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichzeitig. Es gibt aber mindestens noch ein zweites Feld für solche ‚win-win-win‘ –Strategien, nämlich die Verbesserung der **Innovationsfähigkeit** von Unternehmen, Unternehmensclustern und ‚Regionen‘.

Hier liegt ein wichtiger Ansatzpunkt des Projekts. Der Raumbezug, den wir gewählt haben, die Region Hamburg, wird von uns zwar *auch* als ein Raum betrachtet, in dem Stoffströme optimiert werden können und müssen. Andererseits ist schon auf den ersten Blick klar, dass viele unserer Praxispartner als ‚global players‘ auf dem Weltmarkt agieren. Hier wäre es absurd, die gemeinsam zu bearbeitenden Stoffströme auf denjenigen Bruchteil zu beschränken, der sich innerhalb der Region Hamburg bewegt.

Von zentraler Bedeutung ist für uns deshalb die Region Hamburg als ‚Akteursraum‘. Spätestens seit der Studie von Porter über ‚Nationale Wettbewerbsvorteile‘ (Porter, M.: The competitive Advantage of Nations, New York 1990) ist bekannt, dass der Weltmarkterfolg zu einem ganz erheblichen Teil ‚home based‘ ist. Die Unternehmen ziehen ihre Innovationsfähigkeit aus dem Funktionieren regionaler ‚Innovationssysteme‘, aus der lokalen bzw. regionalen Verwurzelung, aus den lokalen und regionalen Verflechtungen mit Konkurrenten, Dienstleistern, Zulieferern usw. Ein derartiger Standortverbund wird auch als „Cluster“ bezeichnet. Die Qualität und Intensität dieser Beziehungen im regionalen ‚Innovationsnetz‘ entscheidet ganz wesentlich mit über die internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Das vorliegende Projekt setzt an der Optimierung derartiger Innovationssysteme bzw. Cluster im Umfeld der Metallbearbeitung an und unterscheidet sich damit deutlich vom klassischen Branchenansatz in vielen F&E-Projekten oder in der Wirtschaftsförderung. Wir hoffen, mit unserem Forschungsprojekt über die Optimierung der regionalen Innovationssysteme der Metallwirtschaft, einen Beitrag zur Steigerung der Standortqualität und Nachhaltigkeit der gesamten Region Hamburg leisten zu können.

Wir gehen darüber hinaus davon aus, dass hier in der Region Hamburg Akteure sitzen, die einen gravierenden Einfluß auf nicht nur regionale, sondern auch nationale bis globale Stoffströme haben. Die Optimierung dieser Stoffströme in Richtung auf das Ziel einer Nachhaltigen Metallwirtschaft dürfte von wesentlich größerer Bedeutung sein, als die Fixierung auf die sicher ebenfalls noch vorhandenen Optimierungspotentiale der Stoffströme innerhalb der Region Hamburg. Insofern fungieren etliche unserer Praxispartner auch als ‚Gravitationszentren‘ nicht nur für die regionalen und nationalen, sondern auch für die globalen Metallstoffströme.

## 2.1.4 Inner- und zwischenbetriebliches Stoffstrommanagement

Der Stand der Kenntnisse über die Details der *innerbetrieblichen* Materialflüsse in den Unternehmen hat sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich verbessert und hat mittlerweile einen qualitativ hohen Stand erreicht. Als Triebkräfte für diese Transparenzanstrengungen sind u.a. just-in-time Konzepte und Verkürzungen der Durchlaufzeiten im Zusammenhang mit der Senkung der Kapitalbindung, produktionsbegleitende Qualitäts-

kontrollen im Rahmen von Qualitätsmanagementsystemen sowie Verringerungen der Losgrößen mit dem Ziel der flexibleren Befriedigung von Kundenwünschen zu benennen.

Allerdings ist hier deutlich zwischen verschiedenen betrieblichen Realitäten zu unterscheiden:

Während im Bereich der großen Unternehmen und der Serienfertiger mittlerweile fast durchgängig sowohl umfassende Materialwirtschaftssysteme als auch differenzierte Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS) im Einsatz sind, die quasi auf "Knopfdruck" einen umfassenden Einblick in die betrieblichen Materialströme ermöglichen, sieht die Situation sowohl im kleineren Mittelstand als auch im Bereich der Werkstattfertiger deutlich anders aus. Aufgrund bislang kaum verfügbarer "small-size" Systeme für die betriebliche Materialwirtschaft und dem kaum vertretbar hohen Aufwand für PPS-Systeme in diesem Umfeld, sind verursachungsgerechte Zulastungen von Material-, Energie- oder sonstigen Umweltverbräuchen zu einzelnen Produkten oder Prozessen in diesen Unternehmen noch nicht möglich.

Auch die Verknüpfung zwischen der Materialwirtschaft (Input) auf der einen und der Abfallwirtschaft (unerwünschter Output) auf der anderen Seite ist in den meisten Unternehmen bislang erst ansatzweise realisiert, obgleich sich aus den dann möglichen Input-/Output Vergleichen wichtige Hinweise auf mögliche Effizienzgewinne ziehen lassen.

Deutlich anders als bei den innerbetrieblichen Stoffströmen sieht die Situation im *zwischenbetrieblichen* Bereich aus:

Hier sind fast nur in der großindustriellen Massenfertigung produktbezogene Stoff- und Materialflussdaten verfügbar. Konkret realisierte Beispiele existieren insbesondere im Automobilbau, wo durch den Systemführer differenzierte Vorgaben an die Stoffauswahl, die Produktionstechnik und die Produktionsergebnisse der Vorlieferanten formuliert und im Rahmen von Total-Quality-Konzepten auch überprüft werden. Durch die Optimierungserfolge dieses "chain-managements" konnten die Automobilproduzenten deutliche Kostenreduktionspotentiale erschließen.

Im überwiegenden Teil der produzierenden Wirtschaft beschränkt sich die Steuerung der überbetrieblichen Stoffströme bislang allerdings auf Preisbetrachtungen und die Definition von Qualitätsmerkmalen in den entsprechenden Handelsverträgen. Selbst bei umfassenderen Lieferantenbewertungen werden die konkreten stoff- und umweltbezogenen Bedingungen der Produktion nicht oder nur sehr pauschal betrachtet.

## **2.2 Richtungssicherheit durch Nachhaltigkeitskriterien**

Im Zuge dieses Forschungsprojekts soll die Innovationsfähigkeit der regionalen Metallwirtschaft entlang der Wertschöpfungskette verbessert und Innovationen in Richtung Nachhaltigkeit vorangebracht werden. Auf einer sehr allgemeinen Ebene ist zwar vor dem Hintergrund der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit relativ schnell eine Verständigung darüber herzustellen, in welche Richtung diese Innovationen gehen sollen. Wobei die Komplexitätsproblematik und die unumgänglichen Zielkonflikte zwischen den drei Dimensionen auch auf dieser allgemeinen Ebene schon auftauchen. Begibt man sich aber auf die Ebene der kleinschrittigen real anstehenden Innovationen stellt sich sehr schnell die nicht so ohne weiteres beantwortbare Frage: Ist diese anstehende Innovation nun (in der Resultante des Kräfteparallelogramms der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit) eine Innovation in Richtung Nachhaltigkeit oder nicht?

Zur Klärung solcher Fragen brauchen wir mindestens zweierlei. Wir brauchen Kriterien (Nachhaltigkeitskriterien) zur Bestimmung der Richtung des Wirkungsspektrums der

anstehenden Innovation, am besten unterschieden nach den drei Dimensionen ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit, und wir brauchen die Fähigkeit Wege (zum Konsens) zur Gewichtung der verschiedenen Richtungsimpulse, also zur Bestimmung der Resultante im dreidimensionalen Richtungs-Kräfteparallelogramm.

Die Erarbeitung eines solchen ‚Handwerkszeugs‘ ist keine leichte Aufgabe, das zeigt schon ein erster Blick auf die unzähligen Arbeitsgruppen und Projekte, die sich damit beschäftigen, angefangen von der UN-Commission for Sustainable Development (CSD inklusive der nationalen Komitees bzw. Begleitkreise) über entsprechende Arbeiten bei der OECD (OECD 1999) bis zu den 226 Einträgen im ‚Compendium of Sustainable Development Indicator Initiatives and Publications‘ (IISD 2000, <http://iisd.ca/measure/compinfo.htm>). Es ist klar, dass man allein mit dieser Aufgabe mehrere Forschungsprojekte beschäftigen kann.

Andererseits zeigt uns eine erste Sondierung dieses Feldes aber auch, dass wir für unsere Zwecke nicht einfach eines der vorhandenen Kriteriensysteme übernehmen können. Es bleibt uns also nichts anderes übrig, als einen Weg zu gehen, der grob gesagt eine Mischung aus Eklektizismus, Pragmatik und eigenen grundsätzlichen Überlegungen zum Thema Nachhaltigkeitskriterien darstellt, immer orientiert am eigentlichen Thema des Forschungsprojektes: dem Vorantreiben nachhaltigkeitsorientierter Innovationen beim Umgang mit Stoffen in der Wertschöpfungskette der Metallwirtschaft. Wir brauchen Kriterien zur Abschätzung und Bewertung möglicher Nachhaltigkeitswirkungen von Innovationen im Hinblick auf Stoffe, Prozesse der Stoffgewinnung, -umwandlung, -verarbeitung, -entsorgung und des Recyclings, sowie auf Produkte und Produktgebrauch in ihrem jeweiligen ökologischen, sozialen und ökonomischen Kontext.

Diese Kriterien werden sowohl bei der Wahl zwischen bestimmten Innovationsoptionen eine entscheidende Rolle spielen als auch bei der Überprüfung des Erfolgs, also bei der Evaluation von Maßnahmen und Strategien. Beide Anliegen sind auf eine relative Klarheit sowohl der Zieldimensionen als auch der Bewertungskriterien angewiesen.

## 2.2.1 Was sind Kriterien und welche Anforderungen sind an sie zu stellen?

Ein Blick in die Kriterien- und Indikatorendebatte zeigt, dass eigentlich gar nicht klar ist, was man unter einem Kriterium zu verstehen hat. Ganz abgesehen davon, dass die Begriffe Kriterien und Indikatoren wild durcheinander gehen. Wir werden im folgenden einen relativ breiten Kriterienbegriff verwenden. Indikatoren können dann diesen Kriterien zugeordnet werden. Indikatoren könnten z. B. bei zielorientierten Kriterien deren ‚Erfüllungsgrad‘ anzeigen.

Der Begriff ‚Kriterium‘ hat eine lange philosophische Tradition, in der er keineswegs konstant und eindeutig gebraucht wurde. Trotzdem lassen sich mit Blick auf diese Tradition der logische Status von und Anforderungen an Kriterien etwas präziser bestimmen. Die Bedeutung des Begriffs ‚Kriterium‘ schwankte insbesondere zwischen einer ‚Eigenschaft des zu bewertenden Objekts‘ im Sinne eines „entscheidenden Kennzeichens“<sup>2</sup> und der eines ‚Erkenntnis- bzw. Urteilsinstruments‘ bzw. ‚Prüfsteins‘, im Sinne eines „Maßstabs für die richtige Beurteilung der Dinge“ (Platon und Aristoteles)<sup>3</sup>. In dieser Bedeutung als ‚Urteils- bzw. Erkenntnisinstrumente‘ wollen wir hier Kriterien verstehen und von ‚Werten‘ absetzen, wobei gerade Nachhaltigkeitskriterien auf Werte bezogen (bzw. aus Werten abgeleitet) sind. Es sollte also wenigstens im Prinzip möglich sein, dass Men-

<sup>2</sup> vgl. Mittelstraß 1984, S. 497

<sup>3</sup> vgl. Ritter, Gründer 1976, S. 1247. Bei Wittgenstein ist ein Kriterium ein "methodologischer Terminus zur Angabe der Gründe für die Geltung von (theoretischen und praktischen) Sätzen bzw. für das Vorliegen von Sachverhalten" ebd.

schen mit unterschiedlicher Wertorientierung sich trotzdem auf gemeinsame Bewertungskriterien einigen können. Die Anforderungen an Kriterien entsprechen insofern weitgehend den Anforderungen an wissenschaftliche Methodik allgemein, als wir dort, wo der Wertebezug unvermeidlich oder sogar gewünscht ist, ihn auch offen legen und so weit wie möglich explizieren.

Anforderungen an Kriterien :

1. *Objektivierbarkeit* in dem Sinne, dass die Möglichkeit einer intersubjektiven Verständigung auf sie bestehen sollte, auch bei unterschiedlicher Wertausrichtung der Beteiligten. Nachvollziehbarkeit und Klarheit, bzw. Transparenz, Reproduzierbarkeit und Quantifizierbarkeit sind somit Unterpunkte dieser Anforderung.
2. *Handhabbarkeit*, wobei der Grad bzw. die Art der Operationalisierung sehr unterschiedlich sein kann. Sie kann reichen von der Frage, ob bestimmte Aspekte/Kennzeichen vorhanden bzw. nichtvorhanden sind, bis hin zur ausgearbeiteten und international hoch normierten Experimental- und Messvorschrift, wie wir sie z. B. aus toxikologischen Prüfverfahren kennen (ein Unterpunkt von Handhabbarkeit ist z. B. der Detaillierungsgrad bzw. das Aggregationsniveau).
3. *Leistungsfähigkeit und Fruchtbarkeit*, d. h. sie sollten Richtungssicherheit gewährleisten und nach Möglichkeit das Vorsorgeprinzip berücksichtigen.
4. *Vollständigkeit, Konsistenz und Unabhängigkeit*, d. h. es sollten soweit wie möglich alle relevanten Vor- und Nachteile, Probleme und Wirkungen erfasst werden unter möglichst weitgehender Vermeidung von Überschneidungen oder gar Verdoppelungen (die das Gewichtungproblem zusätzlich verschärfen würden).

Diese Forderungen sind als Leitorientierungen zu verstehen. Es ist auf den ersten Blick klar, dass sich z. B. die Forderung nach Objektivierbarkeit und die nach Fruchtbarkeit und Vollständigkeit in einem Spannungsverhältnis befinden und z. T. widersprechen. Strenge Anforderungen an die **Objektivierbarkeit** bzw. **Operationalisierbarkeit** von Bewertungskriterien führen, wie wir das aus Methodenproblemen der Wissenschaft allgemein kennen, sehr schnell ins Detail, mit der Gefahr, Wesentliches (aber nicht so einfach Operationalisierbares) zu übersehen. Eine sehr weitgehende Objektivierung bis hin zu Quantifizierung führt schnell zu Scheingenauigkeiten bzw. zur unangemessenen Höhergewichtung von quantifizierbaren Aspekten.

Aus der Toxikologie kennen wir diese Situation nur allzu gut. Einerseits sind wir in der Lage, über ein ausgeklügeltes und inzwischen gesetzlich hochnormiertes System von Messverfahren und Experimenten zu relativ gut überprüfbar und reproduzierbaren Toxizitätsdaten zu kommen (LD-50- und NOEL-Werte)<sup>4</sup>. Andererseits reichen diese Daten als wissenschaftliche Grundlage für eine toxikologische Bewertung aber offensichtlich nicht aus<sup>5</sup>, deshalb folgt auf diese Phase der wissenschaftlich exakten Bestimmung von Daten der Aufschlag sogenannter Sicherheitsfaktoren. Der Festlegung ihrer Größenordnung (zwischen Faktor 10 und Faktor 1000) liegen aber ganz im Unterschied zur Exaktheit der Toxizitäts-Tests nur vergleichsweise grobe Abschätzungen des Ausmaßes der (z. T. versuchsbedingt) verbleibenden Ungewissheit (unseres Nicht-Wissens) zugrunde, unter besonderer Berücksichtigung der Unsicherheitsfaktoren Langzeitwirkung,

---

<sup>4</sup> LD-50 bedeutet letale Dosis 50%, d. h. dass bei dieser Dosis die Hälfte der Versuchstiere stirbt. NOEL ist die Abkürzung für ‚no observed effect level‘.

<sup>5</sup> Die erforderliche Überprüfbarkeit und Reproduzierbarkeit dieser Daten ist nämlich nur durch Tierversuche in vergleichsweise kurzfristigen Einzelstoffprüfungen zu gewinnen. Zu den Problemen der Langzeitwirkung, der gleichzeitigen Einwirkung mehrerer Stoffe (Synergismus), der besonderen Sensibilität bestimmter Lebensphasen (Fruchtschädigung) und besonders sensibler Bevölkerungsgruppen (Allergiker) sowie zu der Problematik der Übertragbarkeit von Tierversuchen auf den Menschen erfahren wir auf diese Weise viel zu wenig.

Variabilität der Exponierten, Synergismus und Übertragbarkeit von Tierversuchen. Um also gesellschaftlich praktikabel zu werden, muss das empirisch-exakte Wissen über Toxizität mit dem Ausmaß des Nicht-Wissens, mit begründbaren, in ihrer Höhe allerdings letztlich stark 'gegriffenen' Sicherheitsfaktoren multipliziert werden<sup>6</sup>.

Auch die Forderung nach **Vollständigkeit** erscheint paradox, weil wir wissen, dass dieses Ziel nie erreichbar und seine etwaige Erfüllung auch gar nicht überprüfbar ist. Aber man kann und sollte trotzdem auf möglichst umfassende Bewertung achten. Um zumindest keine vermeidbaren Lücken zu lassen, sind Systematisierungen wichtig. Wir haben deshalb versucht, als 'Kriteriensystem', ein Kriterienraster zu entwickeln. Dieses Raster sollte im Sinne der Handhabbarkeit nicht zu umfangreich sein. Auf der allgemeinsten Zielebene haben wir jede der drei Nachhaltigkeitsdimensionen in nur fünf wesentliche Unterziele ausdifferenziert, aus denen dann die Kriterien 'abgeleitet' werden bzw. auf welche die auf den nächst niederen Ebenen entwickelten Kriterien zu beziehen sind.

Letztlich erfolgte die Aufstellung unseres Kriterienrasters somit im Zuge einer Top-down- als auch einer Bottom up-Bewegung: Top-down wurden aus dem dreidimensionalen Leitbild der Nachhaltigkeit 15 Unterziele (zielorientierte Kriterien) abgeleitet. Diese wurden ergänzt durch Kriterien, die sich aus sehr allgemeinen systemtheoretischen Überlegungen zur 'Überlebensfähigkeit von Systemen in dynamischer Umgebung' entwickeln lassen, durch Kriterien zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips und durch Kriterien, die sich an Tragekapazitäten und Wirkungsmodellen orientieren. Bottom-up wurden zusätzlich Kriterien direkt im jeweiligen Handlungsfeld entwickelt, also insbesondere stoffbezogene, prozessbezogene und produktbezogene Kriterien<sup>7</sup>.

## 2.2.2 Vier Ebenen von Nachhaltigkeitskriterien

Bei den Anforderungen an Kriterien wurde schon angesprochen, dass Kriterien in Kontexte eingebunden und von ihnen abhängig sind. Zwei Kontextbereiche sind dabei besonders wichtig:

1. Der 'Gegenstandsbereich' bzw. das unmittelbare Handlungsfeld. Hier geht es also um die Bewertung von Innovationen bei der Produktgestaltung oder Produktnutzung, um die Bewertung von Innovationen bei Stoffwandlungsprozessen oder von Versuchen zur Schadstoffsubstitution. Aus diesen Kontexten heraus werden 'bottom-up' Bewertungskriterien entwickelt.

2. Der theoretische und strategische Hintergrund, in denen diese konkreten Schritte eingebunden sind. Im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien nach dem Steuerungsmodell sind z. B. Kriterien, die sich am Notwendigen (am 'Überleben'), an Wirkungsmodellen und Tragekapazitäten orientieren, von besonderer Bedeutung. Im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien nach dem Prozessmodell sind dagegen Kriterien gefragt, die sich am Wünschbaren (am 'guten Leben') orientieren, mit deren Hilfe die allgemeinen Nachhaltigkeitsziele in verschiedenen Bedürfnisfeldern konkretisiert und operationalisiert werden.

Bei der Darstellung unseres Kriterienrasters gehen wir von dieser Unterscheidung zwischen Kriterien, die aus den Nachhaltigkeitszielen abgeleitet werden und Kriterien, die sich an Tragekapazitäten und Wirkungsmodellen orientieren, aus. Da mit diesen beiden Ebenen des Wünschbaren einerseits und des Notwendigen andererseits aber noch je

---

<sup>6</sup> Dass diese Werte (NOEL-Wert mal Sicherheitsfaktor) dann immer noch nicht die letztendlichen Grenzwerte darstellen, ist bekannt. Grenzwerte werden in einem auf dieser Basis erst beginnenden gesellschaftlichen Diskurs in Abwägung von toxikologisch Notwendigem einerseits und (nicht zuletzt auch ökonomisch) Machbarem andererseits regelrecht 'ausgehandelt'. Die wissenschaftliche Stoffbewertung bereitet diesen gesellschaftlichen Diskurs nur vor.

<sup>7</sup> Alle diese 'Ableitungen', Abstraktionen und Auswahlvorgänge sind natürlich wertbehaftet. Das Mindeste, das hierzu gefordert werden kann, ist somit Offenlegung, Transparenz und Nachvollziehbarkeit dieser Schritte.

spezifische Probleme verbunden sind, führen wir dazwischen - sozusagen vermittelnd - noch eine weitere Ebene von Kriterien ein.

Auf dieser vermittelnden Ebene sind ebenfalls ‚abgeleitete‘ Kriterien angesiedelt, die sich aus sehr allgemeinen systemtheoretischen Überlegungen ergeben, sowie Kriterien zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips. Es handelt sich um Kriterien, die den ‚Umgang mit Systemen‘ betreffen, insbesondere verschiedene Arten von Eingriffen in Systeme und die daraus resultierenden potentiellen Wirkungsspektren. Ziel ist letztlich ein ‚angemessener‘ (gegenstandsgemäßer) bzw. ‚angepasster‘ Umgang mit Systemen, die Operationalisierung des Vorsorgeprinzips im Sinne von Behutsamkeit bzw., ihres Gegenteils der ‚Eingriffstiefe‘. Diese Ebene vermittelt somit sowohl nach ‚oben‘ zu den Zielen als auch nach ‚unten‘ zu den Ebenen der ‚Tragekapazitäten‘ und ‚negativen Wirkungen‘.

Diese drei top-down theoretisch abgeleiteten Kriterionebenen werden dann noch von ‚unten‘ (bottom-up) ergänzt, um eine vierte eher induktiv aus der Praxis entwickelte Ebene von Kriterien: Die Kriterien der unmittelbaren Objekt- und Handlungsebene.

Zwischen den zielorientierten theoretisch abgeleiteten und den empirisch entwickelten eher die Ausgangslage widerspiegelnden Kriterionebenen lassen sich zwar Bezüge herstellen, insgesamt verbleibt aber doch noch eine unübersehbare Lücke. Diese Lücke wird sich womöglich auch im Laufe des Gesamtprojekts nur unzureichend schließen lassen.

Die vier Ebenen von Bewertungskriterien:

Vier Ebenen von Bewertungskriterien

1. Ebene (Das ‚gute Leben‘):

- a) Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit
- b) Je fünf aus diesen drei Zieldimensionen abgeleitete Kriterien

2. Ebene (Entwicklungsfähigkeit und Vorsorge):

- a) Die systemtheoretischen Kriterien
- b) Die vorsorgeorientierten Kriterien

3. Ebene (Das ‚Überleben‘):

- a) Die an Tragekapazitäten orientierten Kriterien
- b) Die an Wirkungsmodellen orientierten Kriterien

4. Ebene (Objekt- und Handlungsebene):

- a) Die stoffbezogenen Kriterien
- b) Die prozess- und produktbezogenen Kriterien

Für alle vier Arten von Kriterien existiert natürlich zusätzlich die Aufgabe einer weiteren Ausdifferenzierung hinsichtlich verschiedener räumlicher und zeitlicher Dimensionen. Dies soll kurz am Beispiel der tragekapazitätsorientierten Kriterien verdeutlicht werden: Der

Crash einzelner Firmen (ihr Verdrängen aus dem Markt), der Crash einzelner Sozialsysteme (Marginalisierung einzelner Stadtviertel), der Crash einzelner Ökosysteme (Umkippen einzelner Teiche) wäre auf dem Weg zum Nachhaltigkeitsziel durchaus noch zu akzeptieren (reine win-win-win-Schritte werden eher die Ausnahme bleiben). Der Zusammenbruch ganzer Nationalökonomien oder ganzer sozialer Sicherungssysteme (z. B. Gesundheitswesen, Alterssicherung) und das Umkippen ganzer Meere wäre sicher nicht zu akzeptieren. Auch für die Erhaltung der Biodiversität muss geklärt werden, auf welche Raumeinheiten sie sich beziehen soll. Das Aussterben von Arten auf globaler Betrachtungsebene ist unwiderruflich und schon mit Blick auf die Entwicklungschancen zukünftiger Generationen absolut zu vermeiden, das Verschwinden von Arten aus bestimmten Landstrichen allerdings nicht unbedingt. Unsicherheit besteht allerdings bei der Frage, wie viele Landstriche wir verloren geben können, ohne zugleich das globale Aussterben zu riskieren. Das Vorsorgeprinzip, dem wir in Nachhaltigkeitsstrategien eine besondere Bedeutung zumessen, zwingt uns hier zu größter Behutsamkeit.

Aus der ganzen geschilderten Komplexitätsproblematik heraus versuchen wir unser System eines objektivierbaren, handhabbaren, leistungsfähigen und möglichst vollständigen Bewertungsrasters dadurch ‚einfach‘ zu halten, dass wir uns auf allen Ebenen, wenn immer möglich, eher defensiv am Notwendigen (also an den Mindestvoraussetzungen für Nachhaltigkeit) als am Wünschenswerten, an der Ausmalung einer Utopie ‚Nachhaltigen Wirtschaftens‘ orientieren.

### ***2.2.2.1 Kriterien, die sich an den Nachhaltigkeitszielen orientieren***

Hier werden die Ziele und Werte bzw. Leitbilder aus den drei Nachhaltigkeitsdimensionen zum Ausgangspunkt genommen, also z. B. das ‚gute Leben‘ mit Bedürfnisbefriedigung, Gerechtigkeit, Freiheit, Gesundheit und individuellen Entfaltungsmöglichkeiten bei gleichzeitiger Stabilität und Entfaltung von Wirtschaft, sozialem Zusammenhalt und Natur. Ausgehend von diesen und noch weiter ausdifferenzierten Werten wird versucht, diese Werte zu operationalisieren. Insoweit dies gelingt, kann dann mit Hilfe von Kriterien ‚defensiv‘ nach der ‚Verträglichkeit‘ mit ihnen oder ‚offensiv‘ nach dem Zielerreichungs- bzw. nach ihrem jeweiligen ‚Erfüllungsgrad‘ gefragt werden.

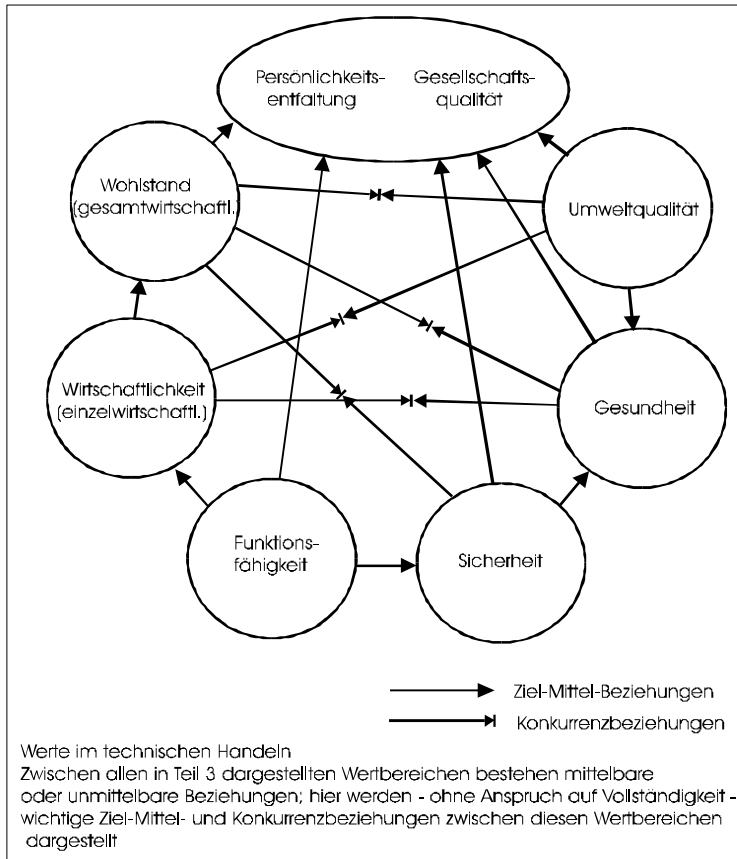
Beispiel für solche schon in der Diskussion befindliche Wertesysteme bieten die Abbildungen 1 und 2, wobei auch gleich zu sehen ist, dass dort eine Trennung zwischen ‚Werten‘ bzw. ‚Leitvorstellungen‘ einerseits und der ‚Summe bisheriger schlechter Erfahrungen‘ andererseits entweder nicht versucht wurde oder nicht möglich war. Manche Werte und Ziele werden uns eben erst richtig bewusst, wenn sie bedroht sind, bzw. wenn wir Mangel empfinden.



Abb. 1: Werte im technischen Handeln (nach VDI-Richtlinie 3780)

Abbildung 1:

Werte im technischen Handeln



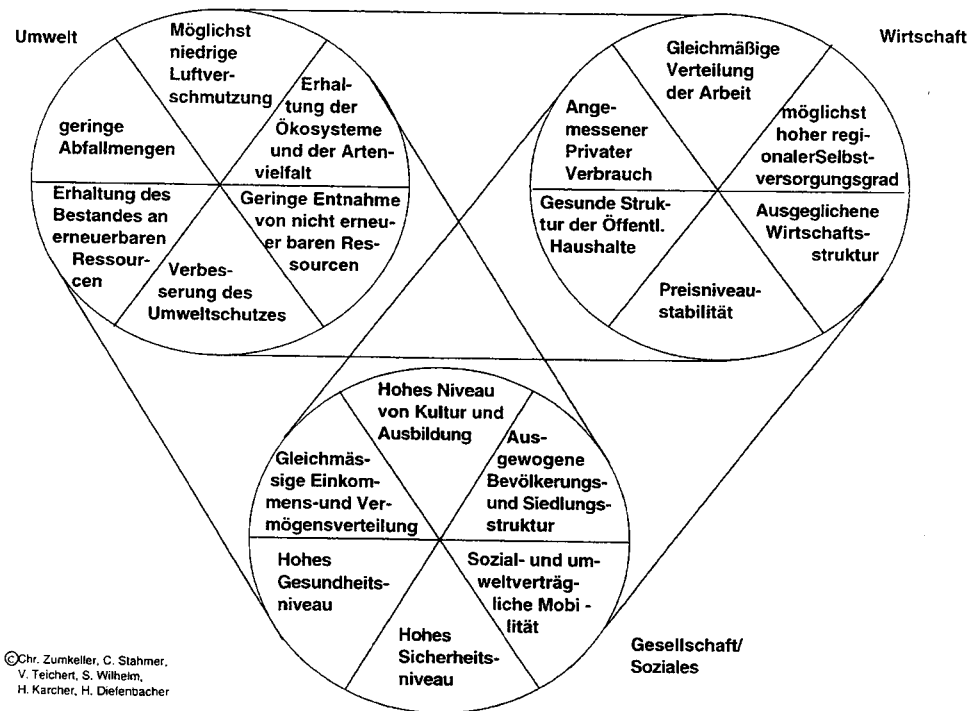
Aus: VDI 1989

Auffallend an dieser schon etwas älteren Darstellung ist das Fehlen der für die Nachhaltigkeitsdebatte zentralen Aspekte der inter- und intragenerationellen Gerechtigkeit sowie die für ein heutiges Verständnis kaum noch nachvollziehbaren Konkurrenzbeziehungen zwischen Wohlstand (gesamtwirtschaftlich) sowie Wirtschaftlichkeit (einzelwirtschaftlich) einerseits und Umweltqualität sowie Gesundheit andererseits.

Aber auch beim Blick auf Abbildung 2, als einem aktuellen Beispiel für ein dreidimensionales Nachhaltigkeitszielsystem, fällt auf, dass zwischen ‚offensiven‘ abgeleiteten Zielkriterien und ‚defensiven‘ tragekapazitätsorientierte Kriterien nicht differenziert wird, und dass mit Begriffen wie ‚angemessen‘, ‚ausgeglichen‘, ‚ausgewogen‘ und ‚gesund‘ die Probleme der Operationalisierung in beiden Kriterienarten eher verschoben denn gelöst werden.

Abb. 2: Zauberscheiben der Nachhaltigkeit

Abb.: Zauberscheiben der Nachhaltigkeit



(Aus: TA-Datenbank-Nachrichten Nr. 1/2000, S. 85)

Unser Vorschlag für je fünf aus den drei Nachhaltigkeitsdimensionen abgeleitete Unterziele sieht demgegenüber folgendermaßen aus:

### Ökonomie:

- Erhaltung/Vermehrung des Geld- und Sachkapitals** (Wertschöpfung, Anlagen, öffentliche Infrastruktur, Geldwert)
- Erhaltung/Vermehrung des Humankapitals** (Bildung und Ausbildung, Forschung und Entwicklung, Kreativität)
- Erhaltung/Vermehrung des Naturkapitals** (Kultivierung, langfristige Verfügbarkeit von Rohstoffen, Energie, (Süß-)Wasser, Fläche)
- Nachhaltigkeitsoptimierte Allokations- und Marktfunktionen** (funktionierende Märkte inkl. Internalisierung bisher externalisierter Kosten)
- Wettbewerbsfähigkeit** (Innovationsfähigkeit, Fähigkeit zur langfristigen strategischen Planung auf der unternehmens- und auf der volkswirtschaftlichen Ebene)

### **Soziales:**

- a) **Inter- und intragenerationelle Gerechtigkeit** (Chancengleichheit / Chancenverbesserung durch z. B. Generationenvertrag, Entschuldung, fairer Handel, Schritte in Richtung Verteilungsgerechtigkeit)
- b) **Sozialer Zusammenhalt/soziale Sicherheit** (Kooperation, Solidarität, Geborgenheit, soziale Sicherungssysteme, Qualität und Quantität von Arbeitsplätzen)
- c) **Demokratische (freiheitliche/offene) Verfasstheit** (Gesellschaft, Staat, Institutionen, Bewegungs-, Handlungs- und Meinungsfreiheit, Schutz der Privatsphäre, Zugang zu Kultur, Bildung und Wissenschaft)
- d) **Gesundheit** (körperliches und seelisches Wohlbefinden)
- e) **Lebensqualität** (Menschenwürde, Identität, Kreativität, sozio-kulturelle Entfaltungsmöglichkeiten und Teilhabe)

### **Ökologie/Natur:**

- a) **Erhaltung / Vermehrung evolutionärer Freiheitsgrade** (Entfaltungsspielräume für Evolutionsprozesse, Strukturen, Grenzen, Übergänge)
- b) **Erhaltung der Biodiversität** (Schutz seltener und besonders sensibler Ökosysteme)
- c) **Artgemäßer Umgang mit der Mitwelt** (Vermeidung von Störungen, Leid, Tierschutz )
- d) **Vermeidung/Verminderung der Langfrist-Intoxikation** (Immissionen, z. B. POPs, Schwermetalle)
- e) **Vermeidung/Verminderung der Dissipation/Entropie-Produktion** (Emissionen, Abfälle)

Auch diese fünfzehn Unterziele decken sicher nur einen Teil des in den drei Nachhaltigkeitsdimensionen Angestrebten ab. Und es eröffnen sich auch mit ihnen große Probleme bei der weiteren Operationalisierung, insbesondere beim Versuch der Zuordnung von Indikatoren zu den Unterzielen, mit deren Hilfe die Annäherung an das jeweilige Unterziel beschrieben oder gar ‚gemessen‘ werden könnte.

Ein viel grundsätzlicheres Problem solcher an Werten bzw. Leitbildern orientierter Kriterien stellt allerdings nicht nur die tendenzielle Unendlichkeit bzw. Unermesslichkeit von Bedürfnissen dar,<sup>8</sup> sondern auch die zunehmende gesellschaftliche Varianz (bis hin zur Kontingenz) von Werten in modernen Gesellschaften. An welchen Werten sollen wir uns orientieren? Reicht hier ein allgemeiner Konsens der Meinungsführer aus? Es sei hier nur als ein Beispiel für diese Problematik auf die von verschiedener Seite geäußerte Kritik hingewiesen, die Nachhaltigkeitsdebatte sei nichts anderes als die Fortsetzung des westlichen Kulturimperialismus mit anderen Mitteln (vgl. Politische Ökologie Heft 63/64, Jan. 2000).

Derzeit ist das Nachhaltigkeitsziel über alle gesellschaftlichen Gruppen und Kontinente hinweg noch konsensfähig wie kaum ein zweites. Wir riskieren allerdings diesen bisher noch auf einer sehr allgemeinen Ebene vorhandenen breiten gesellschaftlichen Konsens,

---

<sup>8</sup> Die maslowsche Bedürfnispyramide entgeht dem Problem auch nur insofern, als Maslow sich eher am ‚Überleben‘ als am ‚guten Leben‘ orientiert.

wenn jeder für sich alles überhaupt Wünschbare, alles ‚Schöne, Gute und Liebe‘ darunter subsumiert, wenn jeder glaubt, seine (alten und neuen) Utopien von Freiheit, Gleichheit und Brüderlichkeit, von Kommunismus, Spiritualismus oder Ökozentrismus (Deep Ecology) oder von ‚nachhaltigem wirtschaftlichem Wachstum‘ völlig ungebrochen im Rahmen der Nachhaltigkeitsdebatte wiederzufinden bzw. mehrheitsfähig machen zu können. Es empfiehlt sich also eine Selbstbeschränkung im Zieldiskurs der Nachhaltigkeit.

Immerhin hat sich hier längst ein Hauptwertediskurs herauskristallisiert. Im Zentrum steht und stand von Anfang an die Gerechtigkeit und zwar als Gerechtigkeit sowohl zwischen den heute lebenden als auch - und das war die wesentlich neue Dimension - insbesondere zwischen den heute lebenden und den zukünftigen Generationen. Der Schwerpunkt liegt dabei auch weniger auf der Verteilungsgerechtigkeit (also auf der materiellen Gleichheit), sondern stärker bei der Verteilung der Entwicklungschancen (Chancengleichheit). Wenn man die letztere allerdings wirklich ernst nimmt, kommt dem Umgang mit dem globalen ‚Erbe der Menschheit‘, ökonomisch gefasst unter anderem in der Vorstellung von der ‚Erhaltung (und Vermehrung) des ökonomischen, des Human- und Naturkapitals‘, ein besonders hoher Stellenwert zu. Dann muss sich z. B. ein zentraler Aspekt von Nachhaltigkeitsstrategien um die Reichweite und Nutzungsrate natürlicher Ressourcen und um den Erhalt der Biodiversität drehen, und es handelt sich bei diesen beiden Zielen weniger um ein ‚ökologisches‘<sup>9</sup> als um ein ‚soziales‘ und ‚ökonomisches‘ Problem. Dasselbe gilt im übrigen auch für die nächste Gruppe von Kriterien, bei denen es vor allem um die Tragekapazitäten lebenswichtiger Subsysteme (also ‚überlebenswichtiger‘ ökonomischer, sozialer und ökologischer Systeme) geht. Die ‚Natur‘ dürfte den Zusammenbruch großer Ökosysteme wesentlich leichter ‚verkräften‘ als die Menschheit.

### ***2.2.2.2 Kriterien, die sich an Tragekapazitäten und Wirkungsmodellen orientieren***

Quelle dieser Gruppe von Kriterien sind sozusagen alle unsere bisherigen schlechten Erfahrungen, angefangen von Unternehmenskonkursen bis zum Börsencrash, angefangen vom Arbeitsstress bis zur sozialen Kälte und Vereinsamung, angefangen von der einzelnen Mülldeponie bis zum Treibhauseffekt und – darauf aufbauend - unser wissenschaftliches Wissen über Wirkungsmodelle (Ketten von Ursache-Wirkungsbeziehungen) und Tragekapazitäten (also z. B. im ökologischen Bereich critical loads oder dem global warming potential von treibhausrelevanten Gasen).

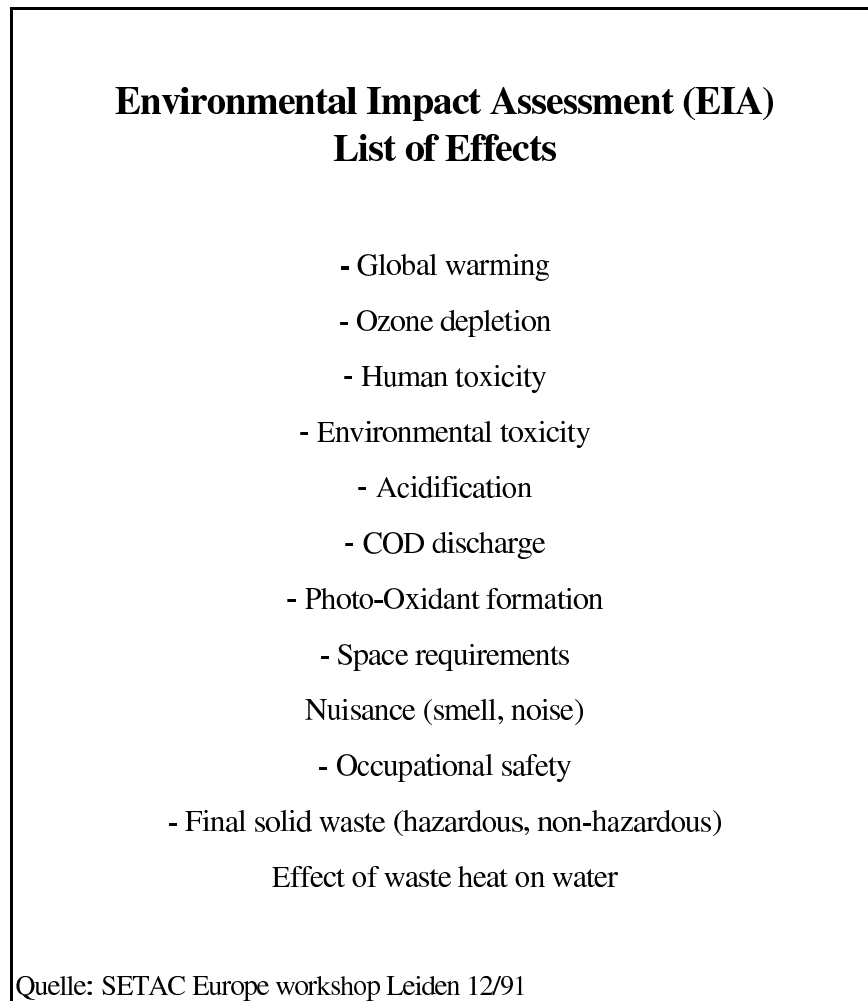
Ein Tableau solcher Kriterien bietet mit starkem Fokus auf ökologische Probleme, aber durchaus nicht beschränkt darauf (vgl. Humantoxizität und ‚Unannehmlichkeiten‘ wie Gestank und Lärm) die Liste, die die Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) im Zuge der Vorarbeiten für die Normierung von Ökobilanzen aufgestellt hat<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Die Reichweite natürlicher Ressourcen ist primär ein soziales und ökonomisches und erst sehr vermittelt ein ökologisches Problem.

<sup>10</sup> aus UBA 1992, Anhang 23

Abb. 3: Vorschlag für einzubeziehende Wirkungen im Rahmen einer Wirkungsbilanz



Auf unserem derzeitigen Diskussionsstand sind wir nicht in der Lage, ein auch nur einigermaßen vollständiges Raster von Kriterien vorzulegen, das sich an Tragekapazitäten und an Wirkungsmodellen orientiert. Wobei wir Kriterien, die sich an Tragekapazitäten orientieren, für wesentlich wichtiger halten im Rahmen des Nachhaltigkeitsdiskurses, als die viel zahlreicheren Kriterien, die sich an ökonomischen, sozialen und ökologischen Wirkungsmodellen orientieren. Auf beiden Feldern ist aber auch noch viel an nachhaltigkeitsorientierter Grundlagenforschung zu leisten.

Bisher gibt es sehr wenige Kriterien, die sich wirklich an Tragekapazitäten orientieren. Allein in der ökologischen Dimension liegen bisher vier operationalisierbare Kriterien vor: Je zwei im Klimabereich (Treibhauseffekt und Ozonloch) und je zwei als ‚critical loads‘ und ‚critical levels‘ beim Eintrag eutrophierender und versauernder Substanzen in Ökosysteme. Hinsichtlich ökonomischer Tragekapazitäten, z. B. auf nationaler Ebene zu der Frage, wie viel Prozent des Bruttosozialprodukts einer Volkswirtschaft für Umsteuerungsprozesse zur Verfügung stehen, ohne dass ein Crash riskiert wird, oder zur Frage der ‚Tragekapazität des sozialen Zusammenhalts‘ gibt es noch nicht einmal eine wissenschaftliche geschweige denn eine öffentliche Debatte.

Dies ist insofern auch kein Wunder, weil die Bestimmung von Tragekapazitäten komplexer und dynamischer Systeme auf schier unüberwindliche Erkenntnisprobleme stößt. Man kann hier allenfalls von kleinen (in ihrer Qualität auch noch höchst umstrittenen) ‚Wissensinseln‘ in einem Meer von ‚Nicht-Wissen‘ (ja wohl auch von ‚Nicht-Wissbarkeit‘) sprechen.

So wurde z. B. aus dem Wirkungsmodell ‚Treibhauseffekt‘ erst durch die Arbeiten des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) ein tragekapazitätsorientiertes Kriterium entwickelt. Der WBGU hatte nämlich in seinem Jahresgutachten 1995 formuliert, dass wir den Treibhauseffekt ohnehin nicht mehr gänzlich verhindern können, sondern dass es jetzt darauf ankäme, ihn so zu verlangsamen, dass die ökologischen, ökonomischen und sozialen Systeme noch die Chance hätten, sich ohne Systemcrash an die Erwärmung anzupassen (vgl. WBGU 1995). Der WBGU ging dann von der (wohl ziemlich gegriffenen) Annahme aus, dass dies der Fall sein könnte, wenn die Erwärmungsrate  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  in den kommenden hundert Jahren nicht übersteigt (derzeitige Tendenz  $3^{\circ}\text{C}$  in 100 Jahren). Diese  $1^{\circ}\text{C}$  Erwärmung in hundert Jahren soll also die Tragekapazitäten der globalen Subsysteme nicht überstrapazieren<sup>11</sup>.

Für die Zerstörung der Ozonschicht gibt es bisher noch keine vergleichbaren Formulierungen. Ein Verbleiben innerhalb der natürlichen Schwankungsraten von Ozonzu- und -abnahme dürfte hier dem Ziel am nächsten kommen. Auch bei den verbliebenen Bereichen, in denen ‚critical loads‘ und ‚levels‘ formuliert werden konnten, zeigen sich die großen wissenschaftlichen Probleme, mit denen wir zu kämpfen haben, wenn wir die Folgen von Eingriffen in komplexe und dynamische Systeme prognostizieren wollen. Die ‚critical loads‘ sind nämlich stark abhängig von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten und von der Struktur der Systeme, in die eingegriffen wird. Um einen Eindruck von den radikalen Vereinfachungen zu geben, die bei der Bestimmung von ‚critical loads‘ für versauernde und eutrophierende Substanzen notwendig wurden, sei darauf hingewiesen, dass bei ihrer Bestimmung ganze Ökosysteme in einer einzigen Differentialgleichung ausgedrückt werden.

Abb. 4: An Tragekapazitäten orientierte Kriterien

<p>Ökonomie</p> <p>(Volks-)Wirtschaftliche Stabilität und Krisenfestigkeit (Indikator ?)</p> <p>Langfristige Unternehmenssicherung und Strategiefähigkeit (Indikator ?)</p>
<p>Soziales</p> <p>Sozialer Zusammenhalt (Indikator ?)</p> <p>Soziale Sicherheit, Tragfähigkeit der sozialen Netze (Indikator ?)</p>

<sup>11</sup> Inzwischen ist allerdings deutlich geworden, dass für Spezialfälle, z. B. für das ‚Funktionieren des Golfstroms‘ auch diese  $1^{\circ}\text{C}$  Erwärmung schon zuviel sein könnten. Ein Stillstand des Golfstroms, wie er nach Sedimentbefunden in der jüngeren Erdgeschichte schon des öfteren vorgekommen sein soll, hätte dramatische Auswirkungen zumindest auf das Regionalklima in Nordeuropa.

### Ökologie

Vermeidung von dramatischen Klimaveränderungen (Indikator: gwp-Wert von Emissionen)

Vermeidung der Zerstörung der Ozonschicht (Indikator: odp-Wert von Emissionen)

Vermeidung eines Kollapses von Groß-Ökosystemen (Meere, Wälder usw.) (Indikatoren: Critical loads und critical levels für den Eintrag versauernder und / oder eutrophierender Substanzen)

Wichtige Kriterien für unser Forschungsprojekt, die auf Wirkungsmodellen aufbauen, sind insbesondere diejenigen, die sich auf Stoffe beziehen und hier insbesondere sich auf toxikologische und ökotoxikologische Wirkungsmodelle stützen, also z. B.

In der Humantoxikologie die Klassifizierung von Stoffen als:

- Akut toxisch
- Fruchtschädigend
- Krebserregend
- Erbgutschädigend
- Sensibilisierend (Allergien auslösend)
- hinzu kämen noch Unannehmlichkeiten wie ‚übel riechend‘,

oder im Bereich der Ökotoxikologie als:

- Versauernd
- Eutrophierend
- Wassergefährdend
- Persistent, naturfremd und bioakkumulativ (vgl. persistent organic pollutants (POPs) in der internationalen Reglementierung)
- Ozonschicht zerstörend
- Zum Treibhauseffekt beitragend
- Zur bodennahen Ozonbildung beitragend (Sommersmog)

Diese Aufzählung (öko-)toxikologischer Kriterien ist nur als Beispiel zu verstehen. Von einer vollständigen Liste aller unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten relevanter Wirkungsmodelle sind wir weit entfernt. Dieser Mangel wird allerdings durch zwei Aspekte gemildert: Erstens sind viele Kriterien aus der Zielebene - wie schon erwähnt - aus bisher gemachten schlechten Erfahrungen entwickelt worden. So kann man z. B. die toxikologischen Kriterien auch als Operationalisierung bzw. Ergänzung des Ziels ‚Gesundheit‘ betrachten. Zum zweiten dürften die für die Bewertung der jeweils zur Debatte stehenden Innovation wirkungsmodellorientierte Kriterien viel effektiver direkt auf der Objekt- und Handlungsebene entwickelt werden. Mit den Kriterien aus dieser Ebene soll ‚bottom up‘ das ‚abgeleitete‘ Kriterienraster ergänzt werden.

Ein wesentlicher Mangel sowohl der tragekapazitätsorientierten als auch der wirkungsmodellorientierten Kriterien liegt aber gerade in ihrer Orientierung an schon bekannten Wirkungen bzw. Wirkungsmodellen. Das Vorsorgeprinzip ist auf diesem Weg nicht wirklich umzusetzen. Eine Beschränkung auf wirkungsbezogene Kriterien würde uns nämlich zur Fortsetzung unserer unseeligen Geschichte verdammen, dass wir erst ‚aus Schäden

klug' werden. Jedes neue durch Stoffe oder Technologien erzeugte Problem, jede neue ökologische Katastrophe führt dann erst zu einem neuen Kriterium. Auch kann exemplarisch verdeutlicht werden an der obigen von der SETAC vorgelegten 'List of Effects'.

Wenn wir 15-20 Jahre zurückgehen, dürften vier bis fünf Wirkungen aus dieser Zwölferliste noch gar nicht enthalten gewesen sein, weil sie seinerzeit in der wissenschaftlichen und öffentlichen Debatte kaum eine Rolle gespielt haben (z. B. Treibhauseffekt, Ozonloch, Photooxidantien, saurer Regen). Es steht deshalb zu befürchten, dass in den nächsten zwanzig Jahren wohl vier bis fünf neue Umweltwirkungen bzw. daraus abgeleitete Kriterien hinzukommen werden. Dies ist mit Blick auf die nötige Umweltvorsorge ein ausgesprochen unbefriedigender Zustand. Kriterien, die allein auf Wirkungsmodellen aufbauen, machen Vorsorge nur im Hinblick auf schon bekannte Wirkungen möglich. Sie reichen für die Verankerung des Vorsorgeprinzips offensichtlich nicht aus. Es fehlt der Versuch, auch noch unbekannte Risiken (Risiken mit bisher noch unbekanntem Wirkungsmodell) möglichst gering zu halten. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, warum die zwischen den Zielen und den Tragekapazitäten angesiedelte Ebene der vorsorgeorientierten Kriterien im Rahmen dieses Projektes so wichtig ist. Insbesondere die mit dem Nachhaltigkeitsziel einhergehende ‚Langfristorientierung‘ verschafft der Notwendigkeit zur umfassenden Operationalisierung des Vorsorgeprinzips ein sehr hohes Gewicht.

### **2.2.2.3 Kriterien zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips**

Das Vorsorgeprinzip kann umfassend nicht durch einen Blick auf Wirkungen allein gewährleistet werden. Wenn man auch noch gegen mögliche Wirkungen Vorsorge betreiben will, deren Wirkungsmodell bisher noch gar nicht bekannt ist, ist ‚Behutsamkeit‘ das entscheidende Prinzip. Wenn wir noch unbekanntes Terrain betreten, stürmen wir nicht gleich los mit der größten möglichen Schrittweite, sondern wir tasten uns eher behutsam voran. Zur umfassenden Operationalisierung des Vorsorgeprinzips müssen wir also den Blick wenden von der potentiellen Wirkung zum Bewirkenden. Wenn es gelingt ‚die Schrittweite zu bestimmen‘, wenn es gelingt, das Bewirkende des Eingriffs, das auf die Systeme zukommt, zu bewerten hinsichtlich der möglicherweise von ihm ausgehenden Wirkungen, dann lässt sich das Vorsorgeprinzip umfassend operationalisieren, dann ließe sich auch schon vorher etwas aussagen über die Lücke zwischen der Reichweite unserer Handlungen und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen, in der sich das noch unbekannte Risiko verbirgt. Mit Hilfe der auf dieser Ebene angesiedelten vorsorgeorientierten Kriterien sollen also das Ausmaß des Nicht-Wissens über mögliche Wirkungen, sollen zumindest die Dimensionen des gesamten Risikopotentials abgeschätzt werden können, bevor z. B. bestimmte Stoffe im großen Stil im ökotoxikologischen ‚Großlabor Erde‘ getestet werden<sup>12</sup>. Stofflich gesehen stellt z. B. das Inverkehrbringen einer Substanz, die sowohl persistent als auch synthetisch also naturfremd ist, einen besonders großen Schritt dar. Bei dieser Substanz haben wir z. B. damit zu rechnen, dass sie sich auf dem ganzen Globus ausbreitet, eben weil sie auf natürliche Weise kaum abgebaut werden kann. Insofern gilt z. B. die Persistenz einer synthetischen organischen Substanz heute schon allgemein als Alarmsignal, ohne dass man nun im Einzelnen genau weiß, wo diese Substanz überall auftaucht und was sie dort genau anrichten wird, allein weil man weiß, dass persistente naturfremde Substanzen aufgrund ihrer biologischen Nichtabbaubarkeit überall auftauchen, sich anreichern und alles Mögliche bewirken können (vgl. die Beispiele PCBs, FCKWs bzw. insgesamt die POPs).

Es geht bei der Operationalisierung des Vorsorgeprinzips also um die ‚Charakterisierung‘ von Eingriffen in Systeme und damit letztendlich vor allem um Technikbewertung mit Hilfe der Technik- bzw. Prozessbewertungskriterien. Wir werden in diesem Forschungsprojekt

---

<sup>12</sup> vgl. Dieter 1984



vor allem mit drei Kriterien arbeiten: 1. der ‚Entropischen Effizienz‘ als Operationalisierung des Minimierungsgebots, 2. der ‚Eingriffstiefe‘ als Operationalisierung des Gegenteils von Behutsamkeit und ‚Fehlerfreundlichkeit‘ und 3. der ‚Sophistication‘ als Versuch der Operationalisierung des Ziels einer ‚angepassten‘ Technik nach dem Vorbild der Natur.

Bevor wir uns der Vorstellung dieser für das Forschungsprojekt besonders wichtigen Kriterien zuwenden, soll allerdings ein Satz von Kriterien vorgestellt werden, der auf der Basis sehr allgemeiner systemtheoretischer Überlegungen entwickelt wurde.

#### **2.2.2.4 Kriterien, die sich aus sehr allgemeinen systemtheoretischen Betrachtungen ergeben**

Die Grundüberlegung ist auch hier eine defensive. Es wurde nicht an Ziele im Sinne des Wünschbaren gedacht, sondern im Sinne des Notwendigen. Was brauchen alle Systeme als Mindestausstattung zum Überleben in dynamischer Umgebung? Dieser Frage hat sich u. a. H. Bossel gestellt. Er hat zur Beurteilung nachhaltiger Entwicklung, auf der Grundlage systemtheoretischer Betrachtung, den Aufbau und die Anwendung von Leitwerten und Indikatoren beschrieben. Er hat versucht, diejenigen Voraussetzungen (und Fähigkeiten) herauszuarbeiten, die jedes System gewährleisten bzw. entwickeln muss, wenn es in dynamischer Umgebung überleben und entwicklungsfähig bleiben, also ggf. auch in der Lage sein will, selbstgesetzte Ziele zu erreichen. Er kam auf neun ‚Leitwerte‘: Umweltkompatibilität, Wirksamkeit, Handlungsfreiheit, Sicherheit, Wandlungsfähigkeit, Koexistenz, Reproduktionsfähigkeit, psychologische Anforderungen und Verantwortung<sup>13</sup>.

Die besondere Schwierigkeit lag auch bei diesem Ansatz insbesondere darin, einerseits ‚alles‘ erfassen zu wollen und andererseits keine Redundanzen aufzubauen. Ausgehend vom Gesamtsystem der Erde wurden mehrere Untersysteme definiert. Jedes musste dabei für die nächst höhere Ebene einen nachhaltigen Beitrag leisten. In Bossels Ansatz wird Stabilität als ‚Lebensfähigkeit in dynamischer Umgebung‘ verstanden, was deutlich macht, dass es für die in Frage stehenden Systeme auch keinen Stillstand, kein statisches sondern allenfalls ein dynamisches, ein Fließgleichgewicht geben kann. Nachhaltigkeit wird mit ‚Lebensfähigkeit der miteinander korrespondierenden bzw. verflochtenen Teilsysteme‘ gleichgesetzt. Befinden sich Systeme – z. B. auf höchster Ebene die ‚natürliche Umwelt‘, die ‚Anthroposphäre‘ und das ‚Supportsystem‘ – im Gleichgewicht, so ist das System nachhaltig.

Im Zentrum der von ihm sogenannten ‚Orientorentheorie‘ stehen somit die ‚Leitwerte‘, bei denen es sich insbesondere um Fähigkeiten handelt. Es geht um Existenzsicherung, um die dafür nötigen Freiheitsgrade, um Reaktions-, Gestaltungs- und Entwicklungsfähigkeiten.

#### **Die neun Leitwerte nach Bossel:**

1. Streben nach Umweltkompatibilität (Existenz)  
Das System muss dem Normalzustand seiner Umwelt angepasst sein und in ihr überleben können.
2. Wirksamkeit  
Das System muss in seiner Umwelt zurecht kommen, sich die notwendigen Ressourcen (Energie, Materie, Information) beschaffen und Einfluss auf seine Umwelt nehmen können.
3. Handlungsfreiheit  
Das System muss auf die vielfältigen Anforderungen der Umwelt durch angemessenes Verhalten reagieren können.

---

<sup>13</sup> Vgl. Bossel 1999 aber auch schon Müller-Reißmann/Bossel 1979 und 1987

4. Sicherheit

Das System muss sich vor unvorhersehbaren und potentiell gefährlichen Schwankungen der Umwelt schützen können.

5. Wandlungsfähigkeit

Das System muss auf dauerhaften Umweltwandel durch Lernen, Anpassung und Selbstorganisation angemessen reagieren können.

6. Koexistenz

Das System muss auf Vorhandensein und Verhalten anderer Systeme in seiner Umwelt ‚vernünftig‘ reagieren.

7. Reproduktionsfähigkeit

Selbstreproduzierende Systeme (autopoietic systems) müssen reproduktionsfähig sein (entweder als Individuen oder als Gesellschaft / Population).

8. Psychologische Anforderungen

Empfindende Lebewesen haben psychische Bedürfnisse, die befriedigt werden müssen (Akzeptanz der Persönlichkeit, Stress, Schmerzen).

9. Verantwortung

Akteure mit Bewusstsein sind verantwortlich für ihre Handlungen. Sie haben einer normativen Referenz nachzukommen (gesellschaftliche Werte, Verantwortung für kommende Generationen).

Entsprechend der zyklischen (spiraligen) Natur von Entwicklungsprozessen kann dieser Ansatz noch weiter ausdifferenziert werden. So sind je nach Phase (Erneuerung, Wachstum, Erhaltung, Abbau, Umbau, Innovation, Reorganisation) bestimmte Leitwerte von besonderer Bedeutung. Dies kann die Handhabung und die Nachhaltigkeitsbeurteilung von Systemen ggf. vereinfachen, wobei aber kein Leitwert unberücksichtigt bleiben sollte.

### 2.2.3 Vorsorgeorientierte Technik- und Stoffbewertungskriterien

Mit dieser Gruppe von Kriterien soll versucht werden, dem Vorsorgeprinzip umfassend Geltung zu verschaffen. Das erste Kriterium aus dieser Gruppe, die ‚**Entropische Effizienz**‘ stellt mit dem damit verbundenen Ziel der ‚ökologischen Amortisierung‘ den Versuch dar, das vom Vorsorgeprinzip getragene Minimierungsgebot angemessen zu operationalisieren. Richtig ist, dass ein ‚Weniger‘ an Stoff- und Energieströmen im Prinzip auch ein ‚Weniger‘ an Umweltbelastungen und Gefährdungen bedeutet, aber eben nur im Prinzip. Die Sachlage ist leider wesentlich komplizierter, eine Minimierung nach dem Rasenmäherprinzip oft nicht sachgerecht. Wir versuchen deshalb nicht nur die Stoff- und Energieströme zu betrachten, sondern auch die mit ihnen verbundene Entropieproduktion, also auch die ‚entropische Effizienz‘ von Prozessen und Produkten. Und wir versuchen zudem in einem nächsten Bewertungsschritt, diese Entropieproduktion ins Verhältnis zu setzen zum damit verbundenen ‚gesellschaftlichen Nutzen‘. Das ist alles andere als einfach, erstens weil es schon bei der Bilanzierung noch mehr Daten erfordert als bei der Ökobilanz<sup>14</sup>, und weil zweitens mit dem Ziel der ‚ökologischen Amortisierung‘ versucht wird, eine Brücke von naturwissenschaftlichen Fakten zur sozial-ökologischen Frage des gesellschaftlichen Nutzens zu schlagen. In unserem Projekt zur Metallwirtschaft und den mit ihnen verbundenen Stoff- und Energieströmen spielt dieses Kriterium verständlicherweise eine sehr wichtige Rolle.

Mit dem zweiten Kriterium, der ‚**Eingriffstiefe**‘, wird versucht, das Vorsorgeprinzip im Sinne der ‚Behutsamkeit‘ zu operationalisieren. Im Zentrum stehen dabei nicht die Quantitäten von Stoff- und Energieströmen, sondern die Qualitäten struktureller Eingriffe in Systeme und die daraus erwartbaren technischen Risikopotentiale.

---

<sup>14</sup> Insbesondere auch Temperaturniveaus und die chemische Form (z. B. Bindungsart), in der die Stoffe vorliegen.

Auch das dritte Kriterium, die ‚**Sophistication**‘ setzt an der Art und Weise des Umgangs mit Systemen bzw. mit der Natur an. Es wurde bisher vor allem nach der ökologischen Seite hin entwickelt, und stellt den Versuch dar, die Frage nach einer (ökologisch) ‚angepassten‘ bzw. noch weiter gehend nach einer ‚naturgemäßen‘ Technik, nach einer ‚ökologischen Technik nach dem Vorbild der Natur‘ mit Hilfe eines (eher leitbildartigen) Kriteriums zu operationalisieren. Somit stellt die Eingriffstiefe eher Bezüge zu den folgenden an Tragekapazitäten orientierten Kriterien her, während das Kriterium Sophistication einen stärkeren Bezug zu den (ökologischen) Zieldimensionen hat.

Alle drei Kriterien haben für alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit eine große Relevanz, denn die Ressourceneffizienz bzw. das Ausmaß der Entropieproduktion ist viel stärker ein Problem der intergenerationellen Gerechtigkeit als ein ‚ökologisches‘ Problem. Auch bei technischen Großrisiken gilt, dass im Ernstfall in deren Folge großflächig und irreversibel sowohl ökologische, als auch ökonomische und soziale Systeme verwüstet werden können. Und schließlich ist auch die Frage der ‚Angepasstheit‘ von Technik nur zum Teil eine ökologische Frage.

### **2.2.3.1 Entropische Effizienz und Ökologische Amortisierung**

Es geht um den Aufwand, den wir treiben, wenn wir unsere Bedürfnisse befriedigen wollen. Der Umweltaufwand wird heute vorwiegend mit Hilfe von Ökobilanzen zu erfassen versucht. Der absolute Verbrauch an Stoffen und Energien, der mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung verbunden ist, kann schon recht viel aussagen über die damit möglicherweise verbundenen Umweltbelastungen. Es wäre für eine Bewertung von Materialien, Produkten und Prozessen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten aber hilfreich, wenn wir über diese einfache buchhalterische Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen hinausgehen könnten und zwar insbesondere hinsichtlich folgender vier Aspekte:

1. Ökobilanzen bieten bisher wenig Ansatzpunkte für die Integration des Vorsorgeprinzips. Eine – derzeit heftig umstrittene – Möglichkeit bestünde in der Formulierung eines ‚prinzipiellen Minimierungsgebots‘, also im Versuch, den Umfang der mit dem jeweiligen Produkt bzw. Stoff verbundenen Energie- und Stoffflüsse prinzipiell so weit wie möglich herunterzuschrauben. Ein solches ‚Sparen nach dem Rasenmäherprinzip‘ wird aber der Problematik vielfach nicht gerecht. Mit Blick auf mögliche Umweltwirkungen macht es nämlich einen großen Unterschied aus, ob x Tonnen Kies oder x Tonnen Klärschlamm bzw. x Kilojoule Energie aus regenerativen oder aus fossilen Energiequellen eingespart werden können. Auch auf die nachsorgeorientierte ‚List of Effects‘ im Rahmen der Wirkungsbilanz wurde schon hingewiesen und die Frage gestellt, um wie viele Positionen wir diese ‚Liste der bisherigen schlechten Erfahrungen‘ in den kommenden Jahrzehnten wohl erweitern müssen. Die Orientierung an Tragekapazitäten bietet wie erwähnt einen gewissen Fortschritt in Richtung Vorsorgeprinzip wenigstens mit Blick auf schon bekannte Wirkungsmodelle. Mit der angestrebten ‚entropischen Bilanzierung‘ wäre es vielleicht möglich, die Intentionen des allgemeinen Minimierungsgebots‘ mit dem Tragekapazitätsansatz zu verbinden, nämlich dann, wenn es gelänge, zumindest die Größenordnung der globalen Entropieproduktion einerseits und die Größenordnung der ‚entropischen Entsorgungskapazität des Systems Erde‘ andererseits zu bestimmen<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Beim energetischen Aspekt der ‚Entropieerzeugung‘ ist dies durchaus heute schon möglich. Die einzige Möglichkeit der Erde ‚Entropie‘ zu entsorgen bezieht sich ja auch auf den energetischen Aspekt der Entropie. Hier geht es ‚nur‘ um die Wärmeabstrahlung der Erde. Für die Entsorgung der stofflichen Entropie (Dissipation) gibt es nichts Vergleichbares. Das System Erde könnte sich allerdings dann einigermaßen im ‚Gleichgewicht‘ befinden, wenn sich die insbesondere durch die Sonne (Exergie) angetriebene globale stoffliche Entropieminderung mit der durch die

2. Bisher geht die Qualität der Ressourcen nur unzureichend und die Endlichkeit von Ressourcen noch fast überhaupt nicht in die Ökobilanzen ein. Es macht aber einen großen Unterschied, ob nachwachsende oder nicht regenerierbare Stoffe bzw. ob Energie aus regenerativen oder fossilen Quellen ‚verbraucht‘ wird. Gerade der unwiederbringliche Verlust nicht regenerierbarer Ressourcen ist für eine nachhaltigkeitsorientierte Bewertung von großer Bedeutung.
3. Bisher behandelt die Input-Output-Bilanzierung der Ökobilanz die Stoff- und Energieumwandlungsprozesse (ja fast den gesamten Umgang mit den Stoffen und Energien in der Technosphäre) weitgehend als Black Box. Dies hat enorme Folgen für daraus sich ergebende Handlungsoptionen, da dadurch das Hauptaugenmerk auf die Schnittstellen zwischen Ökosphäre und Technosphäre gelegt wird. Es spricht allerdings sehr viel dafür, dass sich an diesen Schnittstellen zwar die ökologischen Probleme äußern, dass dort aber nicht die wichtigsten Ansatzpunkte für die ‚Lösung‘ dieser Probleme liegen. Ansatzpunkte für die Lösung liegen weniger in einer ‚end-of-the-pipe‘-orientierten Abfall- und Emissionspolitik und auch weniger in der Ressourcenpolitik oder –ökonomie. Die ‚Lösung‘ liegt zum größten Teil *innerhalb* der ‚Black-Box‘ also beim ‚Umgang mit den Stoffen in der Technosphäre.  
Es wäre für eine nachhaltigkeitsorientierte Bewertung von Innovationen also z.B. von größtem Interesse, nicht nur Energie-, sondern auch Stoffwandlungsprozesse nach ihrem ‚Wirkungsgrad‘ beurteilen zu können. Im Energiebereich ist uns das seit den Arbeiten von Carnot möglich. Auf der Basis seiner Arbeiten kann man den aktuellen ‚Wirkungsgrad‘ von z. B. Kraftwerken vergleichen mit dem ‚idealen Carnot-Prozess‘. Damit können Effizienzgewinne bewertet und vor allem auch noch unausgeschöpfte Effizienzpotentiale ziemlich klar benannt werden. Etwas Vergleichbares gibt es für Stoffumwandlungsprozesse bisher leider noch nicht. Auch hier könnte die Entropiebilanz den ersten Schritt in diese Richtung darstellen. Der entropische Wirkungsgrad von Stoffwandlungsprozessen könnte uns Aufschluss geben über Prozesse mit der bestmöglichen Ausnutzung des in die Prozesse eingehenden Ordnungsniveaus und über diejenigen Prozesse mit der geringsten Entropieproduktion.
4. Schließlich wäre es interessant, die Entropieproduktion und damit einen wichtigen Aspekt des Umweltbelastungspotentials, der mit Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen verbunden ist, ins Verhältnis zu ihrem Nutzen (und ggf. ihrem Umweltentlastungspotential) setzen zu können. Denn auch dies ist für eine Gesamtbewertung von größter Wichtigkeit. Es ist ja durchaus möglich oder gar wahrscheinlich, dass ein Mehreinsatz an Stoffen und Energien an einer Stelle im Produktlebenszyklus, sich an anderer Stelle um ein Mehrfaches auszahlt<sup>16</sup>. Das wäre dann ein Vorgang, den wir als ‚tendenzielle ökologische (bzw. nachhaltigkeitsorientierte) Amortisation‘ bezeichnen.

Dem Kriterium ‚entropische Effizienz‘ und dem Ziel einer nachhaltigkeitsorientierten Amortisation liegt der Gedanke zugrunde, dass sowohl im abiotischen als auch im biotischen Bereich die natürlich vorfindbaren Ressourcen also z. B. die Konzentration von technisch interessanten Stoffen in Erzlagerstätten oder die Existenz einer Humusschicht, die den Anbau nachwachsender Rohstoffe ermöglicht, als ‚Geschenke der Natur‘, als ‚Erbe der Menschheit‘ zu betrachten sind, mit dem nicht zuletzt mit Blick auf die Interessen zukünftiger Generationen sehr sorgsam umgegangen werden muss<sup>17</sup>.

Menschheit verursachten globalen stofflichen Entropieerzeugung (Dissipation) so ungefähr die Waage halten würden.

<sup>16</sup> Auch dies ist ein Hinweis darauf, dass das allgemeine ‚Minimierungsgebot‘ zu grob ist.

<sup>17</sup> Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass dies kein ökologisches Problem darstellt. Es handelt sich in erster Linie um ein Gerechtigkeitsproblem, in zweiter Linie um ein (ressourcen)ökonomisches Problem und erst in dritter Linie um

Unsere Nutzung der Natur beruht also auf den Ergebnissen (und Wechselwirkungen) der abiotischen, insbesondere kosmologischen und erdgeschichtlichen (Mineralien, Erzlagerstätten, Reliefstruktur, Sonnenenergie, Klima, Wasserhaushalt) und der biotischen Evolution (Organismen mit ihren Stoffen, Strukturen und Leistungen, Biosphäre). Dieses ‚Erbe der Menschheit‘ kann man als ‚thermodynamisch unwahrscheinliche‘ Zustände fern vom Gleichgewicht‘ betrachten, als evolutionär entstandene ‚Ordnungsniveaus‘ (Neg-Entropie). Die thermodynamisch wahrscheinlichere – aber für unsere Nutzungsbedürfnisse katastrophale - Alternative wäre somit ein Zustand der absoluten statistischen Gleichverteilung aller Moleküle im System Erde (z. B. aller Metallionen in der Erdkruste). Möglich geworden ist der vorfindbare, thermodynamisch unwahrscheinliche, Aufbau von Ordnungsniveaus in Form von Erzlagerstätten sowohl durch die Abkühlungsenergie der Erde, bzw. durch Wechselwirkungen zwischen Erdkruste und Erdmantel (magmatogene Lagerstättenbildung), durch Schwerkraft und Gesteinsdruck (diagenetische Lagerstättenbildung) und durch den permanenten Energiezufluss der Sonne (Verwitterung und Sedimentbildung)<sup>18</sup>.

Ein wichtiger Aspekt der Nachhaltigkeitsproblematik liegt nun gerade darin, dass wir diese Ordnungsniveaus ‚vernutzen‘. In ‚geschlossenen Systemen‘ ist dies unvermeidbar (2. Hauptsatz). In diesem Fall kann es nur um eine Verlangsamung dieses Prozesses gehen, also vor allem um die Frage einer möglichst effizienten Nutzung (größtmöglicher Nutzen bei geringstmöglicher Entropieproduktion, z. B. Kaskadenprinzip). Nun haben wir es in der Wirklichkeit in den seltensten Fällen mit ‚geschlossenen Systemen‘ zu tun. Insofern ist es interessant darauf hinzuweisen, dass die biologische Evolution und natürliche Ökosysteme es uns vormachen, wie in ‚offenen Systemen‘ Ordnungsniveaus nicht nur sehr effizient vernutzt, sondern insgesamt auch gesteigert werden können (gespeist natürlich durch die von der Sonne gelieferte Exergie). Dies wäre ein anstrebenwertes Vorbild für ‚Nachhaltiges Wirtschaften‘. Wissenschaftlich-technische Ansätze in dieser Richtung eines Wirtschaftens nach dem Vorbild der Energie- und Stoffflüsse in Ökosystemen werden derzeit v.a. im Rahmen des Konzeptes ‚Industrial Ecology‘<sup>19</sup> verfolgt.

Das Kriterium ‚entropische Effizienz‘ bzw. das Bewertungsverfahren zur Bestimmung einer möglichen ‚nachhaltigkeitsorientierten Amortisierung‘ des Umweltaufwandes für die Herstellung und Nutzung eines Werkstoffes oder eines Produkts kann sehr schön anhand des Beispiels ‚Lebenszyklus des Werkstoffs Aluminium‘ verdeutlicht werden.

Nachdem z. B. in der Vergangenheit gerade der Werkstoff Aluminium im Zentrum einer ökologisch motivierten Kritik gestanden hat, insbesondere wegen dem mit seiner elektrolitischen Herstellung verbundenen extremen ‚ökologischen Aufwand‘, sehen wir in unserem Forschungsprojekt gerade in den Metallen - und eben auch im Werkstoff Aluminium - durchaus interessante Perspektiven im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien. Genau besehen hat sich die Kritik am Aluminium allerdings nicht allein am Aufwand, sondern am Aufwand-Nutzen-Verhältnis entzündet, insbesondere dort, wo Aluminium nur relativ kurzfristig und oft auch kaum recycelbar als Verpackungsmaterial eingesetzt wurde.

Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten interessiert allerdings nicht nur der von Ökobilanzen erfasste lebenszyklusbezogene Aufwand für die Herstellung, Nutzung und Recyclierung von Aluminium, sondern v. a. auch die Endlichkeit der Ressource Bauxit (selbst wenn diese derzeit nicht als dramatisch angesehen wird) und schließlich das Aufwand-Nutzen-Verhältnis über den ganzen Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 5).

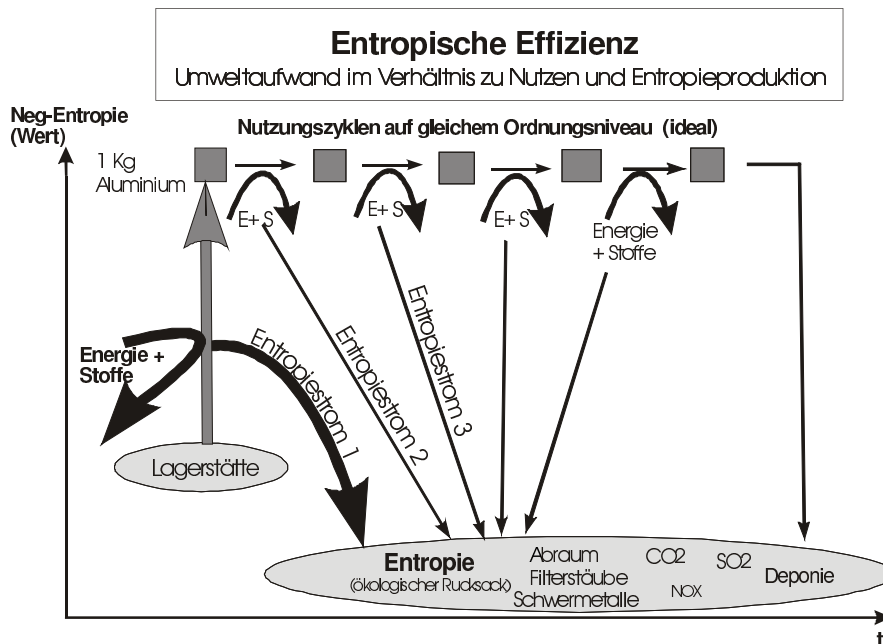
---

ein ‚ökologisches‘ Problem (insbesondere der ‚Entropie-Entsorgung‘).

<sup>18</sup> Vgl. Pohl 1992

<sup>19</sup> Vgl. z. B. Ayres 1996; Erkman 1997; Ehrenfeld

Abb. 5: Entropische Effizienz – Das Beispiel Aluminium



**Tendenzielle ökologische Amortisierung des primären Umweltaufwands :**  
Wenn Entropiestrom 1 sehr viel größer als Entropieströme 2f.

A/G 11/99

Aufgrund der Vorarbeiten der Erdgeschichte, und damit aufgrund der Existenz von Bauxitlagerstätten sind wir nicht gezwungen, den Prozess der Aluminiumherstellung im Zustand statistischer Gleichverteilung aller Aluminiumionen in der Erdkruste (also beim Ordnungsniveau nahe Null) zu beginnen, sondern infolge des Anreicherungsfaktors 4 - 7 auf dem vorfindbaren Konzentrationsniveau von 35 - 55% Aluminiumgehalt im Bauxit<sup>20</sup>. Wir setzen dann Energie (darunter sehr viel elektrische) und Stoffe ein und produzieren ein kg reines Aluminium, aber natürlich nicht nur das, sondern wir produzieren gleichzeitig auch einen großen Entropiestrom in den von Schmidt-Bleek so genannten „ökologischen Rucksack“ (Schmidt-Bleek 1994). Er enthält Abraum, Abfall, Abwärme, Emissionen usw.

Von den Folgen dieser Entropieproduktion werden derzeit allenfalls das Schwinden der Ressourcen, die Begrenztheit der Aufnahmekapazität der Atmosphäre für treibhausrelevante Gase, die Fluor-Emissionen und ggf. noch die Rotschlammdeponien bewusst wahrgenommen. Welches der beiden Probleme: die ‚Vernutzung des Erbes der Menschheit‘ auf der Input-Seite oder die damit verbundene Entropieproduktion auf der Output-Seite zuerst globale Dramatik erlangt, ist derzeit noch offen. Einiges spricht allerdings dafür, dass die Entropieaufnahmekapazität lange vor den verfügbaren Ressourcen ‚erschöpft‘ sein wird. Doch beide Probleme hängen eng zusammen. Die Entropieproduktion ist nur die Kehrseite der Medaille unserer Art und Weise der ‚Vernutzung von Ordnungsniveaus‘ (des ‚Erbes der Menschheit‘). Aus all dem folgt, dass wir unsere Rede von der Endlichkeit der Ressourcen präzisieren müssen.

<sup>20</sup> Es handelt sich um Verwitterungslagerstätten. Der Anreicherungsfaktor für Bauxit ist im übrigen einer der kleinsten, weil Aluminium mit 8% Anteil den dritthäufigste Grundstoff der Erdkruste darstellt. Andere Anreicherungsfaktoren liegen erheblich höher z. B. bei Eisenerzen ca. Faktor 10, Kupfererzen ca. Faktor 100 und bei Goldlagerstätten ca. Faktor 2000.

Bauxitvorkommen wird es z. B. auf der Erde noch sehr sehr lange geben. Wenn aber immer magerere Erzlagerstätten ausgebeutet werden müssen, steigt entsprechend proportional der energetische und materielle Aufwand für Gewinnung, Aufreinigung und Konzentration und damit auch die Entropieproduktion. Da der Satz der Erhaltung der Materie gilt, wird es somit zwar auch in Zukunft immer Metalle in Sedimenten geben. Endlichkeit einer Ressource meint dann ‚nur‘ denjenigen Zustand, bei dem der für ihre Gewinnung zu betreibende Aufwand jedes ökonomisch und ökologisch sinnvolle Ausmaß und die dabei erzeugte Entropie die Aufnahmekapazität des Systems Erde als Ganzes übersteigt.

Das unvernünftigste, was wir nun mit diesem erzeugten kg Aluminium tun könnten, wäre, es Korrosion (z. B. im Verbund verschiedener Metalle im Meerwasser) auszusetzen mit der Folge, dass über kurz oder lang tatsächlich eine fast statistische Gleichverteilung der Metallionen in Wasserkörper und später im Sediment erreicht würde. Wir tun das hoffentlich nicht, sondern wir setzen das Material so geschickt ein, dass es erstens im Leichtbau Energie sparen hilft, dass es zweitens im Rahmen langlebiger und reparierbarer Produkte mehrmals wiederverwendbar und dann - wenn dies nicht mehr geht - als Material mehrmals auf gleichem Ordnungsniveau wiederverwertet wird (vgl. Abbildung 5)<sup>21</sup>.

Auch diese Nutzungs- und Recyclingprozesse sind entropisch gesehen natürlich nicht ‚umsonst‘ zu haben. D. h. mit jedem Wiederverwendungs- und Wiederverwertungsprozess ist ein zusätzlicher Aufwand an Energie und Stoffen nötig, der wiederum den Entropiegehalt des ‚ökologischen Rucksacks‘ vergrößert. Wenn allerdings der Aufwand für die Wiederverwendung und Wiederverwertung wesentlich kleiner ist, als derjenige für die Primärproduktion (was beim Aluminium mit Blick auf den Energieverbrauch ca. um den Faktor 10 der Fall ist!), dann wird zwar der Entropiegehalt des ökologischen Rucksacks mit jedem Recyclingumlauf absolut größer, bezogen auf die einzelne Nutzeinheit wird er dagegen mit jedem neuen Recyclingdurchlauf tendenziell kleiner. Das ist es, was hier als tendenzielle ökologische Amortisierung bezeichnet werden soll.

### **2.2.3.2 Technische Risiken und das Kriterium Eingriffstiefe**

Wenn wir vorsorgeorientierte Technikfolgenabschätzung betreiben wollen, müssen wir uns die Technik ansehen. Wenn wir das Ausmaß unseres ‚Nicht-Wissens‘ über mögliche Folgen bestimmter Eingriffe in komplexe und dynamische Systeme einigermaßen abschätzen wollen, müssen wir den Blick wenden von der Wirkung (vom target, vom ‚System, in das eingegriffen wird) zum Bewirkenden (zur Charakterisierung des Eingriffs, der Technik, der verwendeten Stoffe usw.). Es geht im Folgenden also um die Frage, ob es rationale Gründe dafür gibt, bestimmte Technologien als ‚Risikotechnologie‘ zu bezeichnen.

Es geht sozusagen um die Unterscheidung zwischen dem ‚Spalten von Steinen‘ und dem ‚Spalten von Atomen‘, um die Unterscheidung zwischen dem ‚Anlegen eines Komposthaufens‘ und der ‚Freisetzung von FCKWs oder PCBs‘, um die Unterscheidung zwischen dem ‚Töten von Organismen‘ und ihrer ‚gentechnischen Manipulation‘.

Bestimmte Techniken als Risikotechnologien herauszustellen, ist nicht gleichbedeutend mit der Behauptung, dass mit Techniken, die nicht unter diesen Begriff fallen, keinerlei

---

<sup>21</sup> Von einem solchen Ziel sind wir allerdings noch weit entfernt. Derzeit wird eine echte Wiederverwertung von Werkstoffen auf gleichem Ordnungsniveau (ohne Verdünnung von Problemstoffen aus den Altstoffen mit Hilfe von Frischware) mit Ausnahme der Edelmetalle und Kupfer in **keinem** der großen Werkstoffbereiche praktiziert, nicht bei den Massenmetallen und schon gar nicht bei den Kunststoffen. Recyclingaluminium ist z. B. mit Kupfer und Eisen belastet, Stoffen, die nicht so ohne Weiteres wieder entfernt werden können. Recyclingaluminium wird deshalb vornehmlich in Gusslegierungen eingesetzt, was gegenüber der Knetlegierung, an die sehr viel höhere Anforderungen gestellt wird, einem down-cycling gleichkommt.

Risiken verbunden seien. Dass es 'Nullrisiko' nicht geben kann, weder im ökonomischen Bereich noch im sozialen, weder im Arbeits- noch im Umweltschutz, darauf kann man sich schnell verständigen. Im Gegenteil, ein wichtiger Faktor für die oben angesprochene Innovationsfähigkeit ist auch der Mut zum (allerdings einigermaßen kalkulierbaren) Risiko. Wenn es einerseits Nullrisiko nicht geben kann, so muss aber andererseits doch nicht gleich 'Alles' riskiert werden. Wer das ganze Unternehmen aufs Spiel setzt, handelt evtl. nur unverantwortlich, und wer gar die 'ganze Welt' oder ganze Kontinente, die Zukunft ganzer Bevölkerungsgruppen aufs Spiel setzt, und auch noch behauptet, er könne das verantworten, der macht sich nur noch lächerlich. Es kommt also auf die Höhe des Risikos an.

Ein erster Schritt zur Klärung der Frage, wodurch sich Risikotechnologien auszeichnen, soll anhand eines Blicks auf die Länge der durch die jeweiligen Eingriffe ausgelösten Wirkungsketten in Raum und Zeit erfolgen. Auch das Spalten von Steinen ist ohne Zweifel riskant, wir sollten z. B. eine Schutzbrille tragen. Aber nach wenigen Sekunden ist der Prozess abgeschlossen und es liegen Stücke und Splitter allenfalls im Umkreis von einigen Metern herum. Das Ergebnis der Spaltung von Atomen ist dagegen nicht nur eine gewaltige Freisetzung von Energie, sondern auch die Erzeugung von radioaktiven Elementen, darunter Plutonium mit einer Halbwertszeit von über 25.000 Jahren, ein immenser Unterschied was die Länge der ausgelösten raum-zeitlichen Wirkungsketten anbelangt.

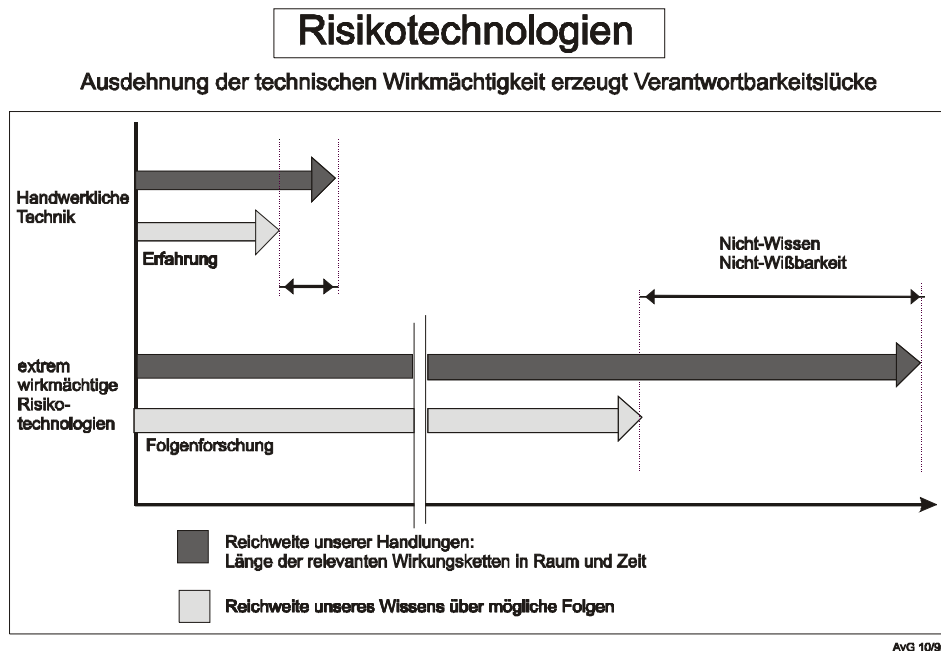
Das Anlegen eines Komposthaufens ist ebenfalls mit Risiken verbunden (z. B. Nitratbelastung des Grundwassers und deren Folgen). Aber auch hier ist die raum-zeitliche Wirkung vergleichsweise begrenzt. Anders verhält es sich mit der Produktion und Freisetzung von naturfremden, persistenten organisch-synthetischen Stoffen wie den PCBs oder den FCKWs. Die als Hydrauliköle hergestellten PCBs haben sich in nur 10 Jahren auf dem ganzen Globus ausgebreitet und waren sowohl im Fettgewebe der Organismen der Arktis als auch der Antarktis nachweisbar. Die FCKWs begannen in über 10.000 m Höhe nach Jahrzehnten ihr ozonzerstörenderes Werk und werden es noch Jahrzehnte fortsetzen (Halbwertszeiten bis zu 160 Jahre).

Schließlich ist auch das Töten von Organismen ein irreversibler Prozess für diesen einen Organismus. Die gentechnische Manipulation führt allerdings zu einer sehr viel weiter gehenden Irreversibilität, nämlich dann wenn sich diese Manipulation mit dem manipulierten Organismus auf alle folgenden Generationen (oder das implantierte veränderte Gen auf andere Organismen horizontal) fortgepflanzt werden kann.

Es gibt also einen gewaltigen Unterschied in der Ausdehnung relevanter Wirkungsketten in Raum und Zeit von lokalen und kurzzeitigen bis hin zu globalen und irreversiblen Wirkungen. Dies soll anhand von Abbildung 6 erläutert werden.



Abb. 6: Risikotechnologien



Auf der X-Achse sind die räumlichen und zeitlichen Reichweiten unserer Handlungen als dunkle und die Reichweiten unseres Wissens über mögliche Folgen als helle Pfeile dargestellt. Bei jeder Technik existiert eine Lücke zwischen der Reichweite unserer Handlungen und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen. Bei jedem Eingriff existiert ein Bereich des Nicht-Wissens, deshalb kann es auch kein Null-Risiko geben. Aber das Ausmaß dieses Nicht-Wissens ist abhängig von der Qualität der Eingriffe, insbesondere von der Wirkmächtigkeit der verwendeten Technologien. Und was diesen Punkt anbetrifft, gibt es ein 'hausgemachtes' Problem durch den technischen Fortschritt, ein Problem, das sich insbesondere im Zuge der wissenschaftlich-technischen Revolution rasant verschärft hat. Wir haben insbesondere durch Verwissenschaftlichung der Technik insbesondere mit der Atomtechnik, synthetischen Chemie und Gentechnik unsere technische Wirkmächtigkeit extrem gesteigert. Mit vergleichsweise geringem Aufwand können wir auf einen Schlag extreme Wirkungen erzeugen, räumlich bis hin zu globalen und zeitlich bis hin zu irreversiblen Wirkungen. In dieser extremen Effektivität und Wirkmächtigkeit liegt ja gerade auch die Faszination, die von diesen drei Technologielinien ausgeht (nicht nur, aber auch für's Militär).

So wie bei den handwerklichen Techniken die Lücke des Nicht-Wissens durch Erfahrung bis zu einem gewissen Grad verkleinert werden konnte, so kann auch durch Forschung die Lücke des Nicht-Wissens bei diesen besonders wirkmächtigen Technologien verkleinert werden. Wir können Forschung (auch Risikoforschung) betreiben, und können damit evtl. erheblich weiter kommen, als durch bloße Erfahrung nach dem Trial-and-Error-Prinzip. Aber die Lücke zwischen der Reichweite unserer Handlungen und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen bleibt doch um ein Mehrfaches größer als dies bei handwerklichen Techniken der Fall ist. Das ist das Kernproblem in der Debatte über die Atomtechnik, die synthetische Chemie und die Gentechnik und der Grund, warum sie als Risikotechnologien bezeichnet werden können.

Doch mit dem Hinweis auf die Wirkmächtigkeit und die dadurch entstehende extrem große Lücke zwischen der Reichweite unseres Handelns und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen ist das Problem der Bestimmung von Risikotechnologien bzw. der Operationalisierung von Behutsamkeit noch nicht vollständig gelöst. Die 'Wirkmächtigkeit', die Länge der relevanten raum-zeitlichen Wirkungsketten, ist, wenn nicht absolut, so doch zumindest relativ, im Vergleich zweier konkurrierender Technologien in den meisten Fällen recht gut bestimmbar. Doch sie taugt nicht (allein) als eindeutiges Unterscheidungskriterium. Genauso wie der Rückgriff auf weniger wirkmächtige Technologien noch lange kein Garant dafür ist, dass globale und irreversible Umweltveränderungen dadurch vermieden werden können.

Globale und irreversible Umweltveränderungen können nämlich mindestens auf drei verschiedenen Wegen ausgelöst werden, und nur eine dieser Möglichkeiten steht hier gerade zur Diskussion, weil sie auf die Qualität (den Charakter) der verwendeten Technologie zurückzuführen ist.

Globale und irreversible Umweltveränderungen, als Extremfälle der Ausdehnung der raum-zeitlichen Länge relevanter ausgelöster Wirkungsketten, können hervorgerufen werden:

1. **Auf einen Schlag, punktuell**, durch extreme Wirkmächtigkeit und Eingriffstiefe der verwendeten Technologie (Bsp. Plutonium, FCKWs, POPs, Freisetzung rekombinanter Mikroorganismen)
2. **Quantitativ, kumulativ**, d. h. allmählich durch quantitative Häufung je für sich relativ harmloser und revidierbarer Eingriffe (Bsp. CO<sub>2</sub>-Emissionen => Treibhauseffekt, Rodung des Regenwalds mit Axt und Feuer)
3. **Aufgrund extrem instabiler Zustände der Systeme**, in die eingegriffen wird (Bsp. Schmetterlingsflügelschlag löst einen Tornado aus<sup>22</sup>, Contergan schädigt Embryonen in der Schwangerschaft, frühkindliche Traumatisierung usw.).

Wenn man globale und irreversible Umweltveränderungen vermeiden will, muss man auf alle drei Möglichkeiten achten und ggf. sogar mit einer Kombination aller drei Möglichkeiten rechnen. Angesichts des dritten Wegs lässt sich im Sinne des Vorsorgeprinzips nur dann etwas ausrichten, wenn wir etwas über diese instabilen Systemzustände oder 'sensiblen Phasen' wissen. Die Suche nach solchen besonders sensiblen Phasen oder Systemzuständen gehört in Ansätzen durchaus schon zum Repertoire der Risikoforschung. Auch zu der Darstellung des Kriteriums Eingriffstiefe zur Operationalisierung der Bestimmung von Risikotechnologien gehört als ganz wesentliches Element der Technologieanalyse somit die Betrachtung des Systems, genauer der 'Systemebene', in die eingegriffen bzw. auf der technisch angesetzt wird.

Ein Kriterium zur Unterscheidung zwischen Risikotechnologien einerseits und behutsameren Techniken andererseits darf, wenn es eindeutig sein soll, nicht (allein) an der Wirkung bzw. Wirkmächtigkeit ansetzen (was beim Kriterium 'Fehlerfreundlichkeit' z. B. noch der Fall ist, vgl. von Weizsäcker 1986), sondern es muss die Art und Weise in den Blick nehmen, in der diese Wirkmächtigkeit zustande kommt. Das Kriterium Eingriffstiefe bezieht sich deshalb auf den Charakter der Technik, auf die Art und Weise des Umgangs mit Objekten oder Systemen.

Entwickelt wurde das Kriterium Eingriffstiefe im Rahmen einer Analyse des Zusammenhangs zwischen naturwissenschaftlichen und technischen Paradigmen, insbesondere

---

<sup>22</sup> Bei diesem viel zitierten Beispiel aus der sogenannten Chaosforschung handelt es sich um eine extrem seltene und unwahrscheinliche aber immerhin denkbare Situation des an sich relativ 'geregelt' Systems 'Wetter in der Region xy'.

zwischen mathematisch-experimentellen naturwissenschaftlichen Disziplinen sowie der auf ihnen basierenden Technologielinien Atomtechnik, synthetische Chemie und Gentechnik, denn es ist sicher kein Zufall, dass jede der drei großen Naturwissenschaften ihre wirkmächtige Technologielinie (und ihre Waffentechnik) hervorgebracht hat<sup>23</sup>.

Die Wissenschaftler der mathematisch-experimentellen naturwissenschaftlichen Disziplinen sind an den Naturgesetzen 'hinter' den Phänomenen interessiert, also an jenen Strukturen und Zusammenhängen, die diese Phänomene hervorbringen und steuern<sup>24</sup>. Ist man auf dieser Suche experimentell erfolgreich, hat man meist auch ein mächtiges Instrumentarium in der Hand. Alle drei großen Naturwissenschaften, die Physik, die moderne Chemie und die Biologie waren erfolgreich: Die Atomstrukturen (bzw. noch tiefer liegend die Elementarteilchen) bestimmen sehr weitgehend die physikalischen Eigenschaften der Dinge. Die Molekülstruktur bestimmt sehr weitgehend die chemischen Eigenschaften der Stoffe, und die Gene bestimmen sehr weitgehend die biologischen Eigenschaften der Organismen. Wenn man an diesen Strukturen technisch ansetzt, erlangt man eine noch nie da gewesene Macht über die Phänomene.

Damit konzentriert sich eine erste Definition der Eingriffstiefe zunächst auf einen wesentlichen Unterschied zwischen behutsameren (eher handwerklichen) Techniken einerseits, bei denen technisch an den unserer unmittelbaren Erfahrung zugänglichen Phänomenen angesetzt wird und den Risikotechnologien Atomtechnik, synthetische Chemie und Gentechnik andererseits, bei denen gerade nicht an den Phänomenen, sondern an denjenigen Strukturen technisch angesetzt wird, die gemäß den Grundprinzipien von Physik, Chemie und Biologie, genau diese Phänomene erst hervorbringen und ganz wesentlich steuern.

Die Eingriffstiefe wird in einem ersten Zugang definiert als *das Erzielen einer extremen Wirkmächtigkeit durch technisches Ansetzen an der Atomstruktur, der Molekülstruktur und an den Genen.*

Allgemeiner lautet die Definition: *Erzielen einer extremen Wirkmächtigkeit durch technisches Ansetzen an elementaren Steuerungsstrukturen.*

Die Eingriffstiefe ist der entscheidende Punkt, wenn es darum geht, das Vorsorgeprinzip in die Risikoanalyse zu integrieren. Sie ist der Grund für die extreme Wirkmächtigkeit von Risikotechnologien mit all ihren Folgeaspekten:

- Eine Verlängerung der relevanten raum-zeitlichen Wirkungsketten bis hin zur Globalität und Irreversibilität
- Eine Vervielfältigung unbeabsichtigter Nebenwirkungen bis hin zur Überwucherung der erwünschten Hauptwirkung durch die unerwünschten Nebenwirkungen
- Ein extrem hohes Risiko- und (z. B. militärisches und terroristisches) Missbrauchspotential
- Eine Verkehrung des Machtverhältnisses zwischen Mensch und Natur<sup>25</sup>

<sup>23</sup> Auf die sehr interessanten wissenschaftstheoretischen und (wissenschafts)historischen Zusammenhänge bei der Entwicklung der mathematisch-experimentellen Naturwissenschaften und dieser drei Technologielinien kann hier nicht näher eingegangen werden. Das Verständnis dieser Zusammenhänge ist aber wichtig, wenn es um die Frage nach möglichen alternativen Wissensgrundlagen geht, für sanftere Technologien als Alternative zu diesen extrem harten Techniklinien (vgl. von Gleich 1989, 1991 und 1999).

<sup>24</sup> Ein Forschungsprogramm, das mit Recht als 'neoplatonisch' bezeichnet wurde.

<sup>25</sup> Mussten sich frühere Generationen gegen eine übermächtige Natur verteidigen, so ist uns insbesondere durch Atomtechnik, synthetische Chemie und Gentechnik die Natur als Ganzes in die Hand gegeben, und zwar - darauf wies Hans Jonas immer wieder zurecht hin -, nicht nur zur (versehentlichen?) Vernichtung, sondern auch zur völligen Umgestaltung. Weshalb Jonas ja nicht den Unfall, sondern das Machbare und sein 'Gelingen' für das größte Problem dieser Techniklinien hielt (vgl. Jonas 1979 und 1985).

Die Kluft zwischen der Reichweite unseres Handelns und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen vergrößerte sich extrem. Dadurch entstand auf der Basis der Wissenslücke in Verbindung mit der extremen Wirkmächtigkeit eine Verantwortbarkeitslücke, die wir nur verkleinern können, indem wir einerseits Risikoforschung betreiben und andererseits - wo immer möglich - auf weniger wirkmächtige und eingriffstiefe, auf behutsamere Technologien zurückgreifen.

### **2.2.3.3 Technik nach dem Vorbild der Natur – das Kriterium ‚Sophistication‘**

Das Kriterium Eingriffstiefe dient zur Bestimmung dessen, was an den Technologien Atomtechnik, synthetische Chemie und Gentechnik der Grund für ihre Risikoproblematik ist. Wenn wir nach Alternativen zu eingriffstiefen Technologien mit hoher Wirkmächtigkeit suchen, bietet sich im Sinne des Vorsorgeprinzips zur Verkleinerung der Lücke zwischen der Reichweite unserer Handlungen und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen, mehr Behutsamkeit an, der Rückgriff auf Technologien mit geringerer Eingriffstiefe und Wirkmächtigkeit, also z. B. Windkraftanlagen statt Atomkraftwerke, naturnahe, biogene und biologisch abbaubare Stoffe statt naturfremde persistente synthetische Chemikalien und der Rückgriff auf kultivierte Organismen (Züchtung durch Auslese) statt auf gentechnisch manipulierte, die in dieser Form niemals in der Natur hätten entstehen können. Die genannten technischen Alternativen sind weniger wirkmächtig, mit ihnen werden (allerdings in Abhängigkeit vom Zustand des Systems in das eingegriffen wird und vom oben schon erwähnten Mengeneffekt) in der Regel nur vergleichsweise überschaubare Wirkungsketten in Raum und Zeit ausgelöst (vgl. Abbildung 6).

Der vom Vorsorgeprinzip geforderte Rückgriff auf Techniken mit geringerer technischer Wirkmächtigkeit ist aber unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten nicht gänzlich unproblematisch. Diese Techniken haben ggf. nicht die gleiche Leistungsfähigkeit wie die Risikotechnologie, die sie ersetzen sollen. Wenn nun versucht wird, ihre geringere technische Wirkmächtigkeit quantitativ auszugleichen durch Erhöhung des Einsatzes an Energie und Stoffen, haben wir sofort wieder ein Mengenproblem (bei der Anzahl der Windkraftanlagen an der Nordseeküste ist das auch schon sichtbar). Es muss also nach anderen Wegen zur Senkung der Material- und Energieumsätze gesucht werden, und eine ‚nachhaltige Technik‘ (sustainable technology) sollte hierzu ebenfalls einen gewissen Beitrag leisten können. Gesucht wird ein alternativer Weg zur Erhöhung technischer ‚Effizienz‘ (im Unterschied zur bloßen Erhöhung der ‚Effektivität‘ durch Eingriffstiefe).

Nicht ohne Grund werden Vorbilder für eine solche Technik in der Natur vermutet.

1. Organismen waren immer schon gezwungen, sparsam mit Stoffen und Energien umzugehen.
2. Die Biosphäre bietet ein schönes Vorbild für eine Kreislaufwirtschaft, in der (angetrieben durch die externe Exergiequelle Sonne) im Laufe der Evolution die Entropie ab und das aufgebaute ‚systemische Ordnungsniveau‘ insgesamt zugenommen hat.
3. Die biologische Evolution arbeitet mit dem ‚Vorfindbaren‘ in einer Mischung aus Anpassung (Opportunismus) und Gestaltung.
4. Sie kennt die Modulbauweise (aus Zellen), die Multifunktionalität von Strukturen und die mehrdimensionale Optimierung und
5. sie arbeitet mit dem Prinzip der Selbstorganisation.

Diese Vorteile ‚technischer Entwicklungen in der Natur‘ dürften ein Grund dafür sein, warum die systematische Beschäftigung mit dem ‚Vorbild Natur‘ in der Bionik derzeit einen Entwicklungsschub verzeichnet (vgl. von Gleich 1998).

Die Hoffnungen, die mit bionischer Technik verbunden werden, gehen somit über eine Strategie der Risikobegrenzung durch größere Behutsamkeit und Rückgriff auf ‚bewährte‘ Technik weit hinaus. Vom ‚Lernen von der Natur‘ erhofft man sich - vermutlich nicht zu Unrecht - elegante und raffinierte technische Lösungen, bei denen mit minimalem Einsatz von Stoffen und Energien vergleichsweise große, allerdings zielgenaue, und hochspezifische Wirkungen erzielt werden können, hohe technische Effizienz also, möglichst ‚evolutionär erprobt‘, mit geringen Risiken und Nebenwirkungen. Ökologische Techniken sollen also nicht nur sanfter, i. S. von weniger wirkmächtig sein. Sie sollen vielmehr durchaus ein gewisses Maß an Wirkmächtigkeit erlangen, allerdings nicht durch die Eingriffstiefe in Naturzusammenhänge, sondern durch ein zielgenaues, hochspezifisches, an die Naturgegebenheiten angepasstes, elegantes, raffiniertes, möglichst ‚naturgemäßes‘ Vorgehen.<sup>26</sup>

Zur Bestimmung, inwieweit eine bestimmte Technik diesem Ziel nahe kommt, soll das Kriterium ‚Sophistication‘ dienen. Für den Begriff ‚sophisticated technology‘ scheint es im Deutschen keine angemessene Übersetzung zu geben. In der Bedeutung schwingt elegant, raffiniert und angepasst mit. Am ehesten trifft vielleicht der Begriff Ausgeklügeltheit das Gemeinte.

Ausgeklügelt, effizient und doch behutsam und angepasst ist eine Technik, die nicht *gegen* die Naturprozesse, sondern *mit ihnen* arbeitet, die sich sozusagen in diese Prozesse ‚einklinkt‘. Sophisticated ist eine Technologie allerdings erst dann, wenn man sich sozusagen nicht nur mit der Natur treiben lässt, sondern sich diese Kräfte ‚zunutze‘ machen kann, und wenn man in der Lage ist, dies sehr geschickt bzw. raffiniert und ausgeklügelt, mit geringem Aufwand an Stoffen und Energien zu realisieren.

Es ist hier nicht der Raum, um intensiv von den vielen interessanten Ansätzen, z. B. auch im Werkstoffbereich, von der Entwicklung von Verbundwerkstoffen auf rein biogener Basis zu berichten, von ‚biocomposites‘, bei denen sowohl die Fasern als auch die Matrix aus biogenen Stoffen aufgebaut ist, mit hochinteressanten technischen und ökologischen Eigenschaften (inklusive hochwertiger Recyclierbarkeit und Kompostierbarkeit). Aber es ist zu vermuten, dass z. B. bei der Werkstoffwahl insbesondere hinsichtlich der Werkstoffbearbeitung, bei den Metallnebenstoffströmen (Beschichtungen, Schmiermittel, Kühlschmierstoffe) und bei der Produktgestaltung bionische Prinzipien auch für die metallischen Werkstoffe zunehmend interessant werden. Über bionische Gestaltungsprinzipien wird derzeit z. B. schon versucht, auf der Basis des vergleichbar schweren (aber auch sehr belastbaren) Werkstoffes Stahl zu Leichtbaukonstruktionen zu kommen (z. B. tailored blanks). Auf zwei über diese Ansätze weit hinausreichende noch utopische Beispiele soll allerdings doch kurz eingegangen werden. Wobei auch gleich gezeigt werden kann, dass der ‚bionische Ursprung‘ einer Technikentwicklung noch lange keine Garantie dafür bietet, dass am Ende auch eine angepasste oder sanfte Technologie herauskommt.

Das erste Beispiel für ‚sophisticated technology‘ mit noch völlig offener Strategie ihrer möglichen (groß)technischen Umsetzung z. B. auch im Bereich der Metallverarbeitung, ist der vom Umweltministerium in Schleswig-Holstein in Auftrag gegebenen Studie zum ‚Kleben in der Natur und in der Technik‘ zu entnehmen (vgl. Ambsdorf; Mieth; Peter 1992). Es bezieht sich auf die technologisch erstaunliche Leistung des Unterwasser-

---

<sup>26</sup> Hier gibt es viele Berührungspunkte zur Konsistenzstrategie im Rahmen der Nachhaltigkeitsdebatte (vgl. Politische Ökologie August 1999).

klebens, die viele Meeresorganismen entwickelt haben. Die Technik mit der sich z. B. die Miesmuscheln mit ihren Byssusfäden am Untergrund festheften, kann als Modell eines Dreikomponenten-Unterwasserklebers betrachtet werden, der im Wesentlichen auf Proteinbasis funktioniert. Kleben unter Wasser und das Ganze unter starken Scherkräften und mit Hilfe eines zunächst stabilen, letztendlich aber dann doch wieder biologisch abbaubaren Klebstoffes, von dieser Leistung sind wir mit unseren derzeitigen technischen Möglichkeiten noch weit entfernt. Und angesichts der weitverbreiteten Meinung, die Technik überträfe die Natur bei Weitem mit ihren Leistungen - so dass die Natur in der Regel 'technisch nachgebessert' werden müsse - kann darauf hingewiesen werden, dass der Klebstoff, mit dem sich Seepocken auf ihrer Unterlage fest heften, den besten verfügbaren Epoxidharz-Kleber um mehr als das Zehnfache an Festigkeit übertrifft.

Das zweite Beispiel dreht sich um die erstaunlichen technischen Eigenschaften von Spinnenseide, ein Werkstoff, der in ferner Zukunft ggf. auch Stahlseile ersetzen können. Die Fäden, die von Webspinnen produziert werden, stellen in ihrer Vielfalt und in ihren Eigenschaftskombinationen einen wirklich phantastischen Werkstoff dar. Mit bis zu sieben verschiedenen Spinnrüden sind manche Spinnen in der Lage, Fäden mit den verschiedensten Eigenschaften zu produzieren, zum Fangen (Dehnbarkeit, Klebrigkeit), zum Konservieren der Beute, zum eigenen Schutz (Haltbarkeit), als Fortbewegungshilfe usw. Auch die 'Entsorgung' nicht mehr gebrauchter Fäden ist in der Natur optimal gelöst. Sie werden als proteinhaltige Nahrung von den Spinnen selbst wieder verspeist und bilden so ggf. den Rohstoff für neue Spinnenseide. Die technologischen Eigenschaftskombinationen der Spinnenseide stellen für Werkstoffwissenschaftler eine außerordentliche Herausforderung dar. Die Seide einiger Seidenspinnen ist doppelt so reißfest wie Stahl und bis zu 50fach so dehnbar wie Perlon. Kein Wunder, dass inzwischen an mehreren Stellen auf der Welt intensiv an Spinnenseide geforscht wird, unter anderem auch im Auftrag der US-Armee, die sich auf diesem Wege bessere schussichere Westen und bessere Fallschirme erhofft.

Aktueller Stand der technischen Entwicklung ist derzeit die Fähigkeit zur Herstellung von Spinnenseide im Labormaßstab auf drei sehr verschiedenen technologischen Pfaden. Es existiert schon das erste Reagenzglas voll Spinnenseide, die auf chemischem Wege synthetisiert wurde, und es existiert auch schon das erste Reagenzglas voll gentechnisch hergestellter Spinnenseide. Dazu wurde ein für Spinnenseide codierendes Gen in ein kultivierbares Bakterium eincloniert. Und schließlich gibt es auch schon die 'klassisch biotechnologische' Spinnenseidegewinnung. Die Versuchsspinnen werden sozusagen 'gemolken', d. h. es werden ihnen pro Tag bis zu 200 m reine Spinnenseide abgezogen. Die Tiere werden dazu mit CO<sub>2</sub> betäubt und fixiert<sup>27</sup>.

Alle drei Wege einer zukünftigen Produktion von Spinnenseide könnten in Zukunft begehbar sein. Es ist nun die Aufgabe einer gesellschaftlichen Debatte – unterstützt so gut es geht durch die wissenschaftliche Hilfeleistungen der 'Technikbewertung' - die letztendlich unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten beste herauszufinden und zu wählen. Die Technikbewertungskriterien 'Eingriffstiefe', 'entropische Effizienz' und 'Sophistication' dürften dabei eine gewisse Rolle spielen.

Das bis hierhin – eher top-down - entwickelte Set an Kriterien zur Bewertung der Richtungssicherheit von Innovationen in Richtung Nachhaltigkeit muss noch weiter ausgearbeitet werden. Viel wichtiger ist allerdings seine Ergänzung durch direkt material-, stoff- und prozessbezogene Kriterien, die direkt aus den Praxisprojekten heraus entwickelt werden. Auf diese Weise müssen noch so wichtige Kriterien wie Human- und Ökotoxi-

---

<sup>27</sup> Dies mag eine ethisch (gegenüber den Spinnen) nicht völlig unproblematische Lösung sein, mit Blick auf die möglichen ökologischen Wirkungen ist sie aber vergleichsweise überschaubar, am ehesten wohl noch vergleichbar mit der traditionellen Gewinnung von Wolle oder Seide.

tät, kumulierter Energieaufwand, Regenerierbarkeit, Persistenz aber auch produkt- und nutzungsbezogene Kriterien wie Gewicht, Korrosion, Verschleiß, Reparierbarkeit, Schweißbarkeit und Recyclierbarkeit ergänzt werden. Erst mit dieser vierten Ebene wird das Raster einigermaßen vollständig.

## 3 Wirtschaftsregion Hamburg

### 3.1 Charakterisierung der Region

#### Geschichtlicher Überblick

Bereits seit dem 7. Jahrhundert sind erste Besiedlungen an den Flüssen Elbe und Alster nachgewiesen. Anfang des 9. Jahrhunderts wurde die „Hammaburg“ errichtet, die der heutigen Stadt ihren Namen gab. Im Jahr 1189 gründete Graf Adolf III von Holstein die Neustadt Hamburg, verlieh ihr die Stadtrechte und erlaubte die Anlage eines Hafens. Im gleichen Jahr sicherte Kaiser Barbarossa den Hamburgern den zollfreien Elb- und Seehandel zu (Anfang Mai, Hafengeburtstag). Während der Hansezeit erlebte Hamburg eine Blütezeit. Die deutschen Kaufleute bauten ein weitverzweigtes Handelssystem auf, das den gesamten Nordeuropäischen Raum umfasste. Mit den Entdeckungsfahrten der südeuropäischen Länder Spanien und Portugal ab dem 16. Jh. verlor die Hanse an Einfluss und die Handelsbeziehungen Hamburgs erweiterten sich in Richtung Südeuropa und Übersee. Im Jahr 1815 wird Hamburg Mitglied des Deutschen Bundes und wird danach „Freie und Hansestadt Hamburg“ (FHH) (Schöne, 1990). 1888 erhält Hamburg den Zollanschluss an das Deutsche Reich und der Freihafen mit der Speicherstadt wird geschaffen.

1937 erhält Hamburg durch das Groß-Hamburg-Gesetz seine heutigen Stadtgrenzen. Seit diesem Zeitpunkt gehören Altona, Harburg-Wilhelmsburg, Wandsbek, Bergedorf und weitere bis dahin preußische Gemeinden zum Hamburger Stadtgebiet.

#### Bevölkerungsentwicklung und regionale Ausdehnung

Mit 1,7 Mio Einwohnern und einer Fläche von 755 km<sup>2</sup> ist die FHH nach Berlin heute die zweitgrößte deutsche Stadt. Die Bevölkerungsdichte betrug 1997 2.257,3 Einw/km<sup>2</sup> (Stat. Landesamt 1999, S. 29). Ihren Tiefstand mit 1,57 Millionen Einwohnern erreichte die Stadt Hamburg 1986, danach waren wieder Zuwachsraten zu verzeichnen, insbesondere von 1988 bis 1992 durch den politischen Wandel in Osteuropa. Seit 1996 ist die Bevölkerungsentwicklung wieder leicht rückläufig (Stat. Landesamt 1999, S. 7).

Als Großstadt und Stadtstaat ist Hamburg stark eingebunden in eine über die Stadtgrenzen hinaus reichende Ballungsregion, die sich weit in die angrenzenden Flächenländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein hinein erstreckt.

Die **Region Hamburg** oder das Hamburger **Umland** umfasst neben der **Kernstadt** Hamburg (= Landesgrenze) die sechs angrenzenden Kreise Pinneberg, Segeberg, Stormarn und Herzogtum Lauenburg in Schleswig-Holstein sowie Harburg und Stade in Niedersachsen. Dieses Gebiet ist 7.304 km<sup>2</sup> groß und hat eine Bevölkerung von 3 Millionen Personen (Bevölkerungsdichte 1997 415 Einw/km<sup>2</sup>). Die Abgrenzung dieser Stadtregion orientiert sich an den Raumordnungsregionen (ROR), wie sie von der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung (BfLR, heute BBR - Bundesanstalt für Bauwesen und Raumordnung) für die Zwecke der empirischen Regionalforschung entwickelt wurden<sup>28</sup> (Handelskammer 2000, S. 12).

<sup>28</sup> Nach der Neuabgrenzung der ROR vom 01.06.96 durch die BfLR gehören zum Verflechtungsraum Hamburg wie zuvor 4 schleswig-holsteinische und 2 niedersächsische Randkreise sowie seit 1996 auch der Landkreis Rotenburg/Wümme. Nach der maßgeblichen Pendlerverflechtung müsste aber eher der Landkreis Lüneburg einbezogen werden, der jedoch

Der Senat der Freien und Hansestadt Hamburg, die Niedersächsische Landesregierung und die Landesregierung Schleswig-Holstein haben 1991 beschlossen, ihre Zusammenarbeit in der **Metropolregion Hamburg** zu verstärken. Zur Metropolregion Hamburg zählen die Stadt selbst und 14 weitere Gebietsteile. Dies sind nördlich der Elbe die zum Land Schleswig-Holstein gehörenden Kreise Herzogtum Lauenburg, Pinneberg, Segeberg, Steinburg, Stormarn und der Wirtschaftsraum Brunsbüttel sowie im Süden die zum Land Niedersachsen gehörenden Landkreise Cuxhaven, Harburg, Lüchow-Dannenberg, Lüneburg, Rotenburg (Wümme), Soltau-Fallingb., Stade und Uelzen. Die Metropolregion Hamburg erstreckt sich über eine Fläche von 18.116 km<sup>2</sup>. In diesem Gebiet leben rund 4,0 Millionen Menschen, was einer Bevölkerungsdichte von 212 Einw/km<sup>2</sup> entspricht (Stat. Landesamt 2000).

Diese an statistischen Daten geknüpften Regionalgebilde bilden keine Grenzen im Sinne dieses Forschungsvorhabens. Wir verstehen die Region Hamburg nicht als geografisch begrenztes Gebiet. Die wirtschaftlichen Verflechtungen einerseits und die in diesem Projekt im Mittelpunkt stehenden Metallstoffströme und deren Nebenstoffströme gehen weit über Hamburg hinaus. Die Rohstoffe werden aus aller Welt bezogen und die Produkte werden wieder weltweit exportiert. Gleichwohl bleibt „Hamburg“ der Akteursraum, in dem die Forschungsfragen mit den beteiligten Wissenschaftlern und Unternehmen bearbeitet werden.

### **3.2 Wirtschaftliche Entwicklung in Hamburg**

Die Wirtschaftsstruktur Hamburgs ist traditionell geprägt durch Hafen und Handel und die damit verbundenen Dienstleistungen. Diese historische Prägung ist trotz starkem strukturellen Wandel in den letzten 25 Jahren (Ölkrise, Wirtschaftskrise in den 80er Jahren) auch heute noch deutlich zu erkennen. In diesem Zeitraum schrumpften die überproportional in der Region Hamburg vertretenen Seehafenindustrien Nahrungs- und Genussmittelproduktion, Mineralöl- und Gummiindustrie und Schiffbau. Während die wirtschaftliche Entwicklung in der Bundesrepublik und insbesondere in den süddeutschen Regionen in den 80er Jahren wieder aufwärts ging, wurde Norddeutschland und Hamburg von dem allgemeinen Wachstumstrend abgekoppelt („Nord-Süd-Gefälle“). Im Süden entstanden viele neue Arbeitsplätze. Im Norden hingegen nahm die Arbeitslosigkeit weiter zu und erreichte 1987 ihren Höhepunkt, dabei gingen insbesondere im Verarbeitenden Gewerbe viele Arbeitsplätze verloren. Einen Rückgang gab es auch beim Handel und Verkehr, während im Kredit- und Versicherungsgewerbe die Beschäftigung stagnierte. Dieser Trend konnte auch nicht durch die positive Beschäftigungsentwicklung bei den 'Sonstigen Dienstleistungen' aufgefangen werden. Gegen Ende der 80er Jahre erholte sich auch die Hamburger Wirtschaft der Kernstadt wieder und die deutsche Wiedervereinigung gab weitere Impulse (Läpple 1993, S. 1-20).

Im Gegensatz zu den eben beschriebenen ungünstigen wirtschaftlichen Auswirkungen in der Kernstadt lag die wirtschaftliche Entwicklung des Hamburger Umlands sogar noch über dem Durchschnitt von Ballungsrändern anderer Großstädte.

In den letzten zehn Jahren folgt Hamburg in der wirtschaftlichen Entwicklung dem Trend der Bundesrepublik. Die Arbeitslosenquote entspricht ungefähr dem Bundesdurchschnitt, Anfang der 90er Jahre lag die Quote etwas unterhalb und 1998 mit 12,7 % liegt Hamburg etwas über dem bundesdeutschen Durchschnitt von 12,3 % (Stat. Landesamt 2000).

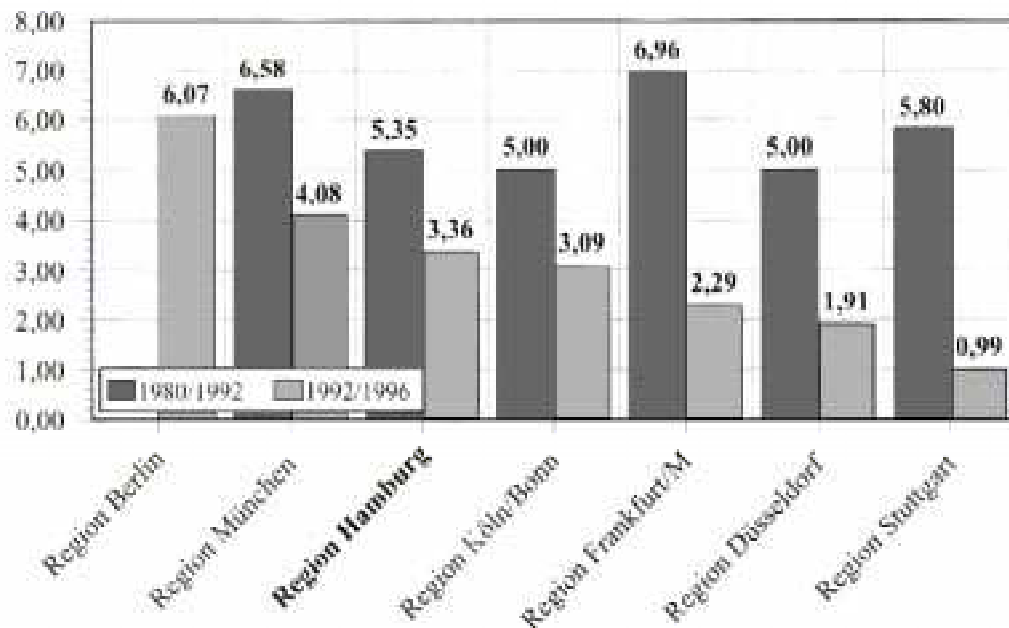
---

einer anderen ROR zugeordnet wurde. Im übrigen bleibt aber eine stärkere funktionsräumliche Verflechtung Hamburgs nach Süden nur mit den Landkreisen Harburg und Stade nachweisbar. Für die Vergleichbarkeit mit den Konkurrenzregionen (Ausnahme: der Berliner Raum) ist die vor 1996 geltende ROR-Abgrenzung zweckdienlicher.



Die Steigerungsraten bei der Bruttowertschöpfung (BWS) waren nach der deutschen Wiedervereinigung nicht so hoch, stiegen aber ab 1997 wieder stärker. Bei einem von der Handelskammer durchgeführten Vergleich mit den größten Stadtregionen Deutschlands (Berlin, München, Frankfurt, Düsseldorf, Köln/Bonn, Stuttgart) lag Hamburg 1996 bei der Bruttowertschöpfung an 4. Stelle. Diese Stellung hält Hamburg auch im zeitlichen Vergleich von 1992 bis 1996 (siehe folgende Abbildung); in jüngerer Zeit befindet sich die Region Hamburg mit einem Wachstum von ca. 3,4 % im Bundesdurchschnitt (Handelskammer 2000, S. 15).

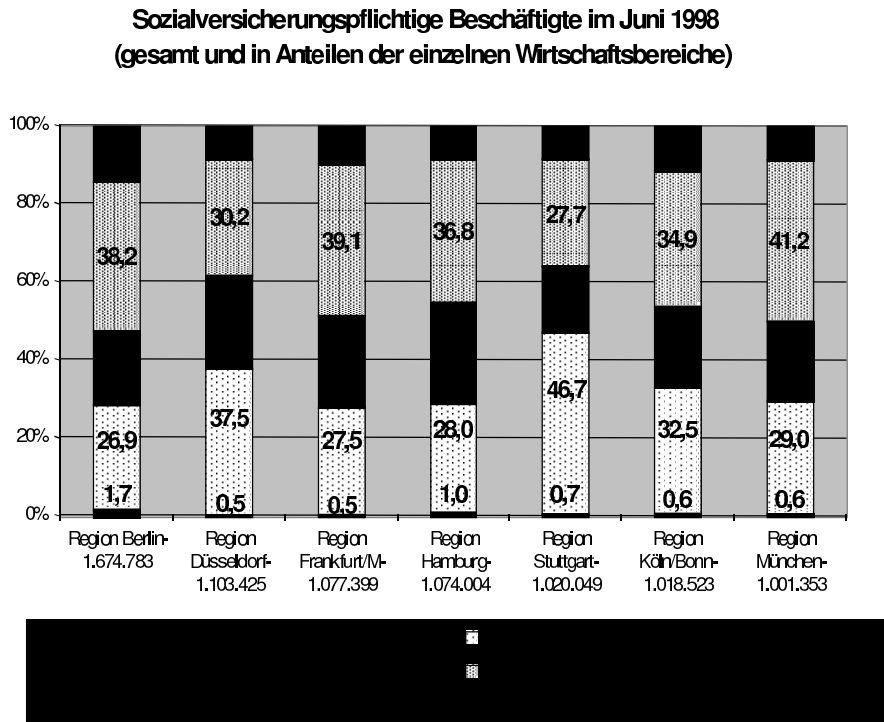
Abb. 7: Veränderung der Bruttowertschöpfung (BWS)



(Handelskammer 2000, S. 16)

Die Wirtschaftsstruktur in Hamburg ist heute durch Dienstleistungen geprägt. Dies sind insbesondere die Dienstleistungen Handel und Verkehr. Aber auch neue Dienstleistungsbereiche wie die Medienwirtschaft haben in Hamburg ihren Platz - z.B. werden 18 der 20 auflagenstärksten deutschen Zeitschriften in Hamburg verlegt (Stat. Landesamt 2000). Bei den Anteilen der Beschäftigten an den Wirtschaftszweigen hat Hamburg im Bereich Handel und Verkehr mit 26% den größten Teil gegenüber den anderen Stadtregionen in Deutschland. Bei den Dienstleistungen befindet sich Hamburg im Mittelfeld, beim Produzierenden Gewerbe liegt Hamburg mit 28% weit hinter den Regionen Stuttgart und Düsseldorf, die noch vornehmlich industriell geprägt sind (Handelskammer 2000, S. 15-18). Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten an den einzelnen Wirtschaftsbereichen für verschiedene Stadtregionen in Deutschland.

Abb. 8: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte, Juni 1998

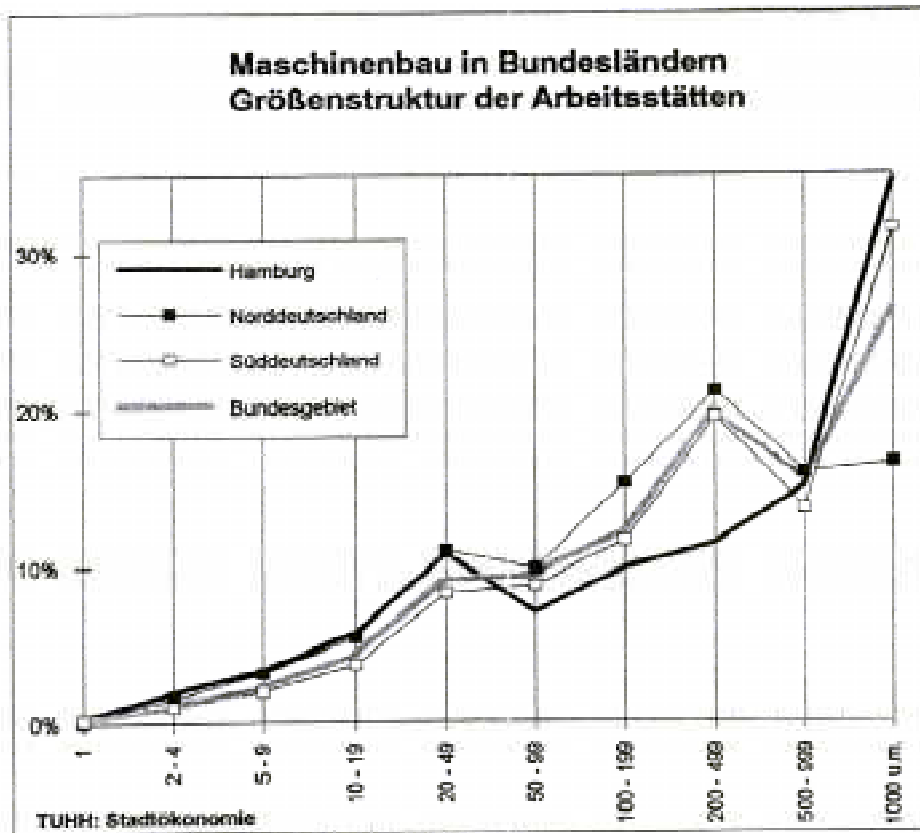


(Handelskammer 2000, S.18,)

Im Gegensatz zur Kernstadt Hamburg hat das Umland andere Schwerpunkte in der Wirtschaftsstruktur, der industrielle Bereich hat ein erheblich größeres Gewicht (40 % aller Arbeitsplätze, Dienstleistungsbereich unter 20 %), es hat damit Ähnlichkeit mit Ballungsräumen in Süddeutschland.

In Bezug auf die Betriebsgrößen haben - über alle Wirtschaftszweige betrachtet - kleinere Betriebsformen im Hamburger Raum einen etwas höheren Anteil als in anderen Ballungsräumen, auch wenn insbesondere im Bereich der maritimen Industrie Großbetriebe dominieren. Im Verarbeitenden Gewerbe haben kleinere Betriebe (bis 100 Beschäftigte) einen höheren und Großbetriebe (über 1000 Beschäftigte) einen deutlich geringeren Anteil als im Durchschnitt der deutschen Ballungsräume. Im Hamburger Maschinenbau sind mittlere Betriebsgrößen (50 – 500 Beschäftigte) stark unterrepräsentiert im Vergleich zum Bundesgebiet, kleine und Großbetriebe sind hingegen stärker vertreten (Läpple 1993, S. 37-40). In der folgenden Abbildung wird die Betriebsgrößenstruktur in Hamburg im Bereich Maschinenbau im Vergleich zu anderen Gebieten in der Bundesrepublik dargestellt.

Abb. 9: Betriebsgrößenstruktur in Hamburg im Vergleich



(Läpple 1993, S. I-40)

### 3.3 Maschinenbau und Metallerzeugung

#### Maschinenbau

Ursprünglich entwickelte sich der Hamburger Maschinenbau in starker Abhängigkeit von den regionalen Absatzmärkten. Dies waren die Hafendienstleister mit einem hohen Bedarf an Fördermitteln, die Werften, die Nahrungsmittelbranche, welche aus Übersee importierte Rohstoffe verarbeitete, und die Bauwirtschaft. Der starke Umbruch in diesen Schlüsselbranchen durch die wirtschaftlichen Turbulenzen in den 70er und 80er Jahren und die Umlandwanderungen waren die Ursachen für die hohen Beschäftigungsverluste in dieser Zeit.

Mit einer Neuorientierung auf andere Märkte tat sich der Hamburger Maschinenbau schwer. In einer Untersuchung, die 1989/90 im Auftrag der Hamburger Wirtschaftsbehörde durchgeführt wurde, wurden dafür mehrere Faktoren genannt (Bukhold 1991). Beim Maschinenbau im Norden Deutschlands dominierte die Fertigung einfacher grobmechanischer Produkte für die Werften, während die feinmechanischen und elektronischen Teile für den Schiffbau aus Süddeutschland kamen. Gerade die Zulieferer für die Werften mit ihrer eher geringen Produktkomplexität kämpften mit Absatzproblemen. In der Nahrungsmittelbranche waren die Unternehmen früh in weltweit operierende Konzerne und deren Zulieferungen eingebunden, daher existierten nur wenige regionale Zuliefernetzwerke. Die Konzentrationsprozesse aufgrund der wirtschaftlichen Krisen

wirkten sich daher negativ auf den regionalen Maschinenbau aus. Weiterhin hatte Hamburg einen Entwicklungsschwerpunkt im Dienstleistungsbereich - Versicherungen, Medienwirtschaft und Banken sind jedoch ungeeignet, dem Maschinenbau neue Impulse zu geben.

Auch historisch war die regionale Verflechtung der Hamburger Wirtschaft aufgrund der früheren Zollgrenzen gegenüber dem deutschen Binnenmarkt und der Außenorientierung durch den Hafen eher gering. Viele Unternehmen waren schon immer stark exportorientiert.

Durch die wirtschaftliche Krise in den 70er und 80er Jahren wurden die genannten Tendenzen noch verschärft. Kleine und mittlere Unternehmen mußten sich aus ihren regionalen Verflechtungen lösen und den teuren und riskanten Weg internationaler Verbindungen suchen, um weiter existieren zu können. Dies konnten sich jedoch nur größere Unternehmen leisten. Eine weitere Möglichkeit, um regionale Defizite auszugleichen, war die Eingliederung in überregionale Konzerne. Weiterhin wurde in der o.g. Untersuchung festgestellt, dass nur geringe zwischenbetriebliche Verflechtungen und Kooperationen mit Forschungseinrichtungen bestehen.

Fazit der Untersuchungen war die Feststellung deutlicher Defizite in den regionalen Verflechtungen. Dies führte nach Bukhold zu folgender Entwicklung in der Hamburger Maschinenbaubranche (Bukhold 1991, S. 189-212):

- große Anlagenbauer mit einer hohen Systemkompetenz bilden einen großen stabilen Kern von Unternehmen,
- dienstleistungsorientierte Vertriebs- und Serviceniederlassungen auswärtiger Großunternehmen bleiben in Hamburg,
- kleine und mittlere produzierende Unternehmen sind Opfer der Hamburger Standortbedingungen, sie sind am stärksten von der schwachen Forschungs- und Kooperationsinfrastruktur betroffen.

Heute hat sich die Situation im Hamburger Maschinenbau etwas entspannt. Während die Anzahl der Beschäftigten in den letzten Jahren weiter rückläufig war, war die Entwicklung bei den Umsätzen durchaus positiv.

## **Metallerzeugung**

Hamburg hat innerhalb seiner Stadtgrenzen einige große Industrieunternehmen im Bereich der NE-Metallindustrie und Stahlerzeugung - das sind die Hamburger Aluminium Werke, ISPAT Hamburger Stahlwerke und die Norddeutsche Affinerie.

Die Norddeutsche Affinerie wurde 1866 in Hamburg gegründet und ist heute der größte Kupferproduzent in Europa. Sie ist die einzige Primärhütte in Deutschland.

Die Aluminium- und Stahlwerke entstanden im Zuge der Wirtschaftsförderung in den 60er und 70er Jahren, als auch die Atomkraftwerke an der Elbe gebaut wurden und somit günstige Konditionen bei der Strombelieferung angeboten werden konnten<sup>29</sup>. Seit 1989 sind die Hamburger Stahlwerke eingebunden in den Konzern ISPAT International (USA).

Der VAW Aluminium AG mit Sitz in Bonn (ein Unternehmen der VIAG Gruppe) gehören die Aluminium Oxid Stade GmbH und die Hamburger Aluminiumwerk GmbH. Seit 1998 sind auch die Reynolds-Werke in den VAW-Konzern integriert.

---

<sup>29</sup> Diese Strategie der Wirtschaftsförderung wurde allerdings schon 1965 in einem von der Wirtschaftsbehörde beauftragten Gutachten (Jürgensen, Voigt) als eher ungünstig eingeschätzt, was die Politik und die tatsächliche Umsetzung allerdings nicht zu beeinflussen schien (Krüger 1991, S. 37).

## **Ausblick**

Beim Verfolgen und Bearbeiten der Forschungsinhalte bleibt uns nichts anderes übrig, sowohl die politischen als auch die geographischen Grenzen der Region Hamburg immer wieder zu überschreiten. Trotzdem bleibt Hamburg das „Zentrum des Geschehens“. Im weiteren Projektverlauf soll noch stärker auf Innovationen/Innovationssysteme in Hamburg eingegangen werden und die Bedeutung der Metallwirtschaft in diesem Zusammenhang. Dazu gehört beispielsweise auch die Betrachtung der Hochschul- und Forschungslandschaft in Hamburg.

## **II. Vorgehensweise**

### **4 Wissenschaftliche Herangehensweise/Zugänge**

Im folgenden Teil werden die Projektansätze und das praktische Vorgehen während dieses Forschungsvorhabens im Überblick vorgestellt.

Die Projektansätze beschreiben zunächst die Herangehensweise; dies beinhaltet sowohl die theoretisch-methodischen Zugänge als auch die Beschreibung der Voraussetzungen für das praktische Vorgehen bei den verschiedenen Teil-/Praxisprojekten (Umsetzungsprojekte). Im Anschluss wird kurz dargelegt, nach welchen Kriterien die Teil-/Praxisprojekte ausgewählt wurden, die dann später im Kapitel 5 eingehender vorgestellt werden.

Ein gemeinsames Werkzeug, das bei der Beurteilung der Teil-/Praxisprojekte eingesetzt werden soll, ist die Stoffstrommodellierung mit Umberto - die theoretischen Grundlagen und der sich bisher eher als schwierig abzeichnende Einsatz in diesem Forschungsprojekt werden danach beschrieben.

#### **4.1 Ausgangssituation**

##### **4.1.1 Forschungs- und/oder Umsetzungsprojekt**

Das Forschungsprojekt wurde bereits bei der Planung bewußt zwischen einem erkenntnisorientierten Forschungsprojekt und einem nutzenorientierten Umsetzungsprojekt plaziert, um aus dem Spannungsverhältnis zwischen Theorie und Praxis Impulse gewinnen zu können.

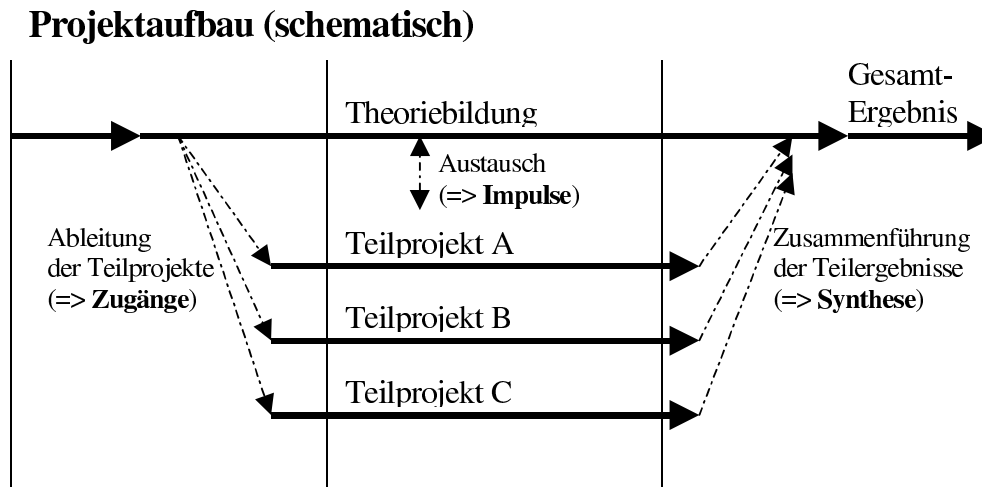
Die Startphase zeigte allerdings, dass sich aus dieser „Zwitter-Eigenschaft“ einige Schwierigkeiten in der Außendarstellung und beim konkreten Betriebszugang ergaben. So war es für den in der ersten Projektphase eingeplanten Auf- und Ausbau des Kooperationsnetzes in der Region notwendig, in den entsprechenden Projektbeschreibungen den gesamten Bogen von der Nachhaltigkeitstheorie bis zu praxisfesten Umsetzungsmaßnahmen in verständlicher Form zusammenzufassen, um der z.T. vorhandenen Skepsis der verschiedenen Akteursgruppen (forschungsorientiert bzw. betriebsorientiert) entgegenzuwirken, die sich in den folgenden Kurzstatements zusammenfassen läßt: „Was ist denn das Neue daran?“ bzw. „Was heißt denn das konkret für uns in der betrieblichen Praxis?“

##### **4.1.2 Theoriebildung und praxisnahe Teilprojekte**

Um den vorstehend angedeuteten „Spagat“ zwischen Forschungs- und Umsetzungsprojekt abzumildern, wurde eine frühzeitig parallele Bearbeitung beider Projektbereiche geplant und realisiert.

In der Konsequenz bedeutete dies, dass einerseits wissenschaftliche Arbeiten zur weiteren Theoriebildung erfolgen, während andererseits in den derzeitigen Teilprojekten (siehe Kapitel 5) konkrete Praxisfelder bearbeitet werden. Die folgende Abbildung zeigt schematisch diesen Projektaufbau:

Abb. 10: Projektaufbau



Im Bereich der **Theoriebildung** spielt insbesondere die Ableitung geeigneter praxisfester und orientierungssicherer Nachhaltigkeitskriterien eine zentrale Rolle. Daneben sind Kernbegriffe im Kontext mit dem gewählten Forschungsobjekt wie z.B. regionale Akteursräume, metallwirtschaftliche Innovationssysteme u.ä. zu definieren und die Einbindung des Gesamtvorhabens in den regionalen, umweltpolitischen und nachhaltigkeitsorientierten Diskurs zu leisten.

Innerhalb der **Teilprojekte** werden gemeinsam mit betrieblichen Kooperationspartnern aus der Region konkrete Umsetzungsschritte verschiedene Aspekte und Facetten einer nachhaltigkeitsorientierten Metallwirtschaft entwickelt und realisiert. Um im Zeitrahmen des Gesamtvorhabens ausreichend Zeit für die Bearbeitung dieser konkreten Teilvorhaben zu haben, mussten sie bereits in einer frühen Projektphase parallel zu dem noch sehr unvollständigen Theoriebild gefunden werden. Aus diesem Grund wurde für diese Praxiszugänge ein vergleichsweise pragmatischer Weg beschritten, der im Nachfolgenden kurz beschrieben wird.

## 4.2 Zugänge

Im Kontext der Gesamtuntersuchung sind zwei Arten von „Zugängen“ zu den Teilprojekten zu unterscheiden:

- Zum einen die Ableitung konkreter thematischer Teilvorhaben als Operationalisierung des im Kern der Untersuchung stehenden Leitbildes „Nachhaltigkeit“ => Thematischer Zugang;
- Zum anderen thematische Aufgaben, die sich aus dem konkreten Aufbau und der Pflege der Kooperationsbeziehungen mit den metallherstellenden und -verarbeitenden Betrieben in der Region ergeben haben => Betrieblicher Zugang.

Diese beiden Arten von Zugängen sind wechselseitig eng miteinander verknüpft. Der Verständlichkeit halber werden sie im Folgenden dennoch getrennt dargestellt.

### 4.2.1 Thematischer Zugang

Als thematische Zugänge für die detailliertere Untersuchung wurden verschiedene Blickwinkel (Bezüge) auf den Untersuchungsgegenstand (Nachhaltige Metallwirtschaft in der

Wirtschaftsregion Hamburg) auf ihre Eignung als zentrale Strukturierungsmerkmale geprüft. Die entsprechenden Diskussionen in der Projektgruppe zeigten, dass unter dem Aspekt der Mehrdimensionalität der Nachhaltigkeit und unter Berücksichtigung eines klaren Akteursbezuges für ein regionales Kooperationsprojekt durchaus verschiedene Bezüge eine gleichrangige Berechtigung und Bedeutung haben.

Die folgenden Bezüge werden aus diesem Grunde als gleichrangige, nebeneinander stehende Strukturierungsmerkmale behandelt:

1. Stoffstrombezug (stoffstromorientierte Ansätze)
2. Prozessbezug (prozessorientierte Ansätze)
3. Regionsbezug (regionaler Ansatz)
4. Produktbezug (produktorientierte Ansätze)

Diese Bezüge werden an dieser Stelle kurz skizziert. Die konkret im bisherigen Projektverlauf entwickelten Ausformungen sind dem Kapitel 5 zu entnehmen.

### **Der Stoffstrombezug (stoffstromorientierter Ansatz)**

Die Erzeugung, Bearbeitung, Nutzung und Kreislaufführung von Metallen (Fe- und NE) stellen als Materialstrom (und als Prozesskette) einige der zentralen Ordnungsmerkmale des Gesamtprojektes dar. Die Metalle sind diejenigen natürlichen Ressourcen, für die in diesem Untersuchungskontext nachhaltige Nutzungs- und Transformationsformen gefunden und weiterentwickelt werden sollen.

Ausgehend von den grundlegenden Eigenschaften dieser Stoffe (Langlebigkeit, hohe „Kreislaufeignung“) wird im Projektrahmen gezielt nach ungenutzten „Nachhaltigkeitspotentialen“ in der Stoffstromkette gesucht. Da aufgrund der räumlichen Schwerpunktsetzung in der Metropolregion Hamburg vorkettenbezogene Optimierungsbetrachtungen bei der Rohstoff- und der Grundstoffgewinnung naturgemäß etwas mehr in den Hintergrund treten, stehen Kreislaufführungsdefizite im Mittelpunkt dieser Betrachtungen.

Als besonders gravierende Kreislaufdefizite lassen sich zusammenfassend die Behinderung des hochwertigen Wiedereinsatzes durch Schadstoffanhaftungen und Störstoffe, sowie die „Vernichtung“ von Legierungswerten durch den nicht ausreichend optimierten, legierungsspezifischen Wiedereinsatz von Schrotten benennen.

### **Der Prozessbezug (prozessorientierter Ansatz)**

Wie vorstehend bereits angeführt, stehen besondere Erzeugungs- und Bearbeitungsprozesse im engen/unmittelbaren Kontext mit dem Metallstoffstrom. Für die wesentlichen in der Region vertretenen Bearbeitungsschritte (spanende und nicht spanende Fertigung, Oberflächenveredelung, (Sekundär-) Verhüttung,...) werden die derzeit bekannten Optimierungsmöglichkeiten einer „Nachhaltigkeitsprüfung“ unterzogen. Dabei stehen vom Projektansatz her allerdings weniger kleinteilige Prozessoptimierungen (Effizienzsteigerungen) im Rahmen des produktionstechnischen Fortschrittes im Zentrum dieser Nachhaltigkeitsprüfungen als vielmehr grundlegende Prozessmodifikationen. Beispiele sind hier die KSS-arme bzw. KSS-freie Zerspanung, die insbesondere den hochwertigen Wiedereinsatz der Späne gewährleisten oder Laserschneidtechniken, die gegenüber spanenden Trennverfahren zu einem deutlich reduzierten Materialverlust führen.

Im Zusammenhang mit der Operationalisierung dieses Bezuges für die Praxispartner zeigte sich allerdings, dass weitere deutliche „Nachhaltigkeitsdefizite“ in der mittelständischen Metallbearbeitung insbesondere auch in nebengeordneten Bearbeitungsschritten wie z.B. der Einzelstück-Lackierung liegen. Unter dem Aspekt, dass für den Aufbau trag-



fähiger Kooperationsbeziehungen insbesondere mit den mittelständischen, metallverarbeitenden Betrieben auch kurzfristig erkennbare Umsetzungserfolge notwendig sind, wurden diese Nebenprozessoptimierungen bei der Auswahl der Praxisprojekte mit berücksichtigt.

### **Der Regionsbezug (regionaler Ansatz)**

Als weiteres konstituierendes Projektmerkmal ist der Bezug auf die „Wirtschaftsregion Hamburg“ zu benennen. Da hier aber weniger von einem abgegrenzten geografischen Raum als vielmehr von einem Akteursraum ausgegangen wird, stehen im Gegensatz zu den eher technisch geprägten vorgenannten Strukturmerkmalen soziale Aspekte der Kommunikation und Kooperation im Mittelpunkt dieser Betrachtung (zum Regionsbegriff vergl. auch Teil 1, Kapitel 3).

Konkret wird hier die Möglichkeit betrachtet, in wie weit ein sehr direkter enger räumlicher Zusammenhang, der den verschiedenen Akteuren im Umfeld nachhaltigkeitsorientierter Innovationssysteme (in den metallverarbeitenden Produktionsketten) den „face-to-face“ Kontakt ermöglicht und damit wesentliche Voraussetzungen für einen wirksamen Umsetzungsprozess bietet.

### **Der Produktbezug (produktorientierter Ansatz)**

Neben den eher produktionsprozessbezogenen Betrachtungswinkeln spielt gerade bei komplexen technischen Geräten, die ja meist das Ziel vielstufiger Metallverarbeitungsprozesse sind, auch die nutzungsbezogenen Optimierungen eine relevante Rolle. Gerade komplexe maschinenbauliche Produkte bieten ein hohes Potential für umweltentlastende Strategien der Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung sowie der Wiederverwendung für gleichartige oder leicht modifizierte Aufgabenstellungen.

Entsprechende Strategien wie Modulbauweise, Reparatur- und Aufrüstungsangebote oder das Recycling von komplexen Komponenten haben neben einer umweltentlastenden Wirkung insbesondere deutliche einzelwirtschaftliche Implikationen. Sie bedürfen einer Veränderung der Geschäftspolitiken in Richtung auf eine verstärkte Dienstleistungsorientierung. Aus diesem Grund sind in diesem Zusammenhang insbesondere auch Unternehmensstrategien, Wertschöpfungsanalysen und Marktbeurteilungen Gegenstand der Untersuchung.

## **4.2.2 Betrieblicher Zugang**

### **Grundsätzliche Aspekte**

Der Aufbau von Kooperationsbeziehungen zwischen den Forschungs- und den Praxispartnern lässt sich grundsätzlich in die folgenden Abschnitte einteilen:

1. Erstkontakt
2. Prüfung und Definition der Kooperationsmöglichkeiten
3. Kooperationsaufbau
4. Kooperation

Ein solches idealtypisches Phasenschema „verdeckt“ allerdings die Vielfalt der zu berücksichtigenden Faktoren, die für einen erfolgreichen Kooperationsaufbau gerade mit KMU in einem ambitionierten Forschungsfeld notwendig sind, sowie die Besonderheiten jeder einzelnen Beziehung.

## Voraussetzungen

Den Betrieben kommt als „Praxispartnern“ aufgrund der skizzierten Grundstruktur des laufenden Vorhabens eine Doppelrolle zu. Einerseits sind sie die Objekte des wissenschaftlichen Interesses, die „untersucht“ werden, andererseits werden sie gerade unter dem mehrdimensionalen Blickwinkel der Nachhaltigkeit als (Wirtschafts-)Subjekte gesehen, die konkreten einzelwirtschaftlichen Nutzen aus dem Umsetzungsprojekt ziehen wollen und sollen.

Aus diesen unterschiedlichen Rollen/Funktionen ergeben sich latente Interessenskonflikte zwischen den Wissenschaftspartnern und den betrieblichen Akteuren. Als zentrale „Erfolgsfaktoren“ für den Aufbau tragfähiger Kooperationsbeziehungen zeigten sich die folgenden:

- Persönliches Vertrauen
- Benennbarer Nutzen
- Klare Rollendefinition
- Schrittweiser Ausbau der Kooperationsintensität

Hierzu im einzelnen:

### Persönliches Vertrauen

Persönliches Vertrauen zwischen dem externen Berater/Forscher und den betrieblichen Akteuren ist **das** zentrale Erfolgselement für den zügigen und reibungsarmen Kooperationsaufbau. Ein derartiges Vorvertrauen wurde jeweils dort vorgefunden, wo in der Vergangenheit in anderen Untersuchungs- oder Beratungskontexten bereits gegenseitig Erfahrungen gesammelt wurden, die von den Beteiligten (subjektiv) als erfolgreich bewertet wurden.

Hier erwies es sich u.a. als hilfreich, dass ÖKOPOL unmittelbar im Vorfeld dieses Vorhabens für die Hamburger Umweltbehörde eine Studie über die Umsetzungsmöglichkeiten der Abfallwirtschaftskonzept- und -bilanz Verordnung in einer Reihe von Hamburger metallverarbeitenden Betrieben durchgeführt hat. In diesem Rahmen konnten den Betrieben konkrete Hilfestellungen bei der betrieblichen Abfalldokumentation an die Hand gegeben werden, die das angeführte subjektive Erfolgsgefühl vermittelten.

Wichtige Unterstützung beim Vertrauensaufbau leistete darüber hinaus die Einbeziehung der Transferpartner. Insbesondere der VDMA verfügt in der Wirtschaftsregion Hamburg über ein tragfähiges funktionierendes Netzwerk aus Betriebskontakten, welches durch die engagierte Beteiligung eines Verbandsmitarbeiters für den Kooperationsaufbau genutzt werden konnte.

Auch Kontakte, die im Rahmen der studentischen Ausbildung (insbesondere Exkursionen und Diplomarbeiten) der FH-Hamburg bestanden, konnten in einigen Fällen zu tragfähigen Kooperationsbeziehungen ausgebaut werden.

Als Hemmnis erwies sich dagegen die thematische Überschneidung mit den aktuellen Arbeiten eines entsorgungsbezogenen Hamburger Betriebsverbundes, dem u.a. einige größere Maschinenbaubetriebe der Region angehören. Die geplanten Forschungsarbeiten wurden von einigen der dort Beteiligten als latente Konkurrenz zu eigenen Aktivitäten im Bereich der überbetrieblichen Kooperation zwischen abfallerzeugenden Betrieben und Entsorgungswirtschaft verstanden. Aus diesem Grund konnten einige eigentlich

naheliegende Betriebskooperationen nicht oder nur unter deutlich zusätzlichem Aufwand bei der Vertrauensbildung erschlossen werden.

### **Erkennbarer Nutzen**

Das gesamte Nachhaltigkeitsprojekt wird von den meisten Angesprochenen zunächst als eher „abgehobenes“ Umweltthema verstanden. Da gerade die strategische Umweltausrichtung in den kleineren metallverarbeitenden Betrieben und den entsprechenden Selbstorganisationen nicht als betriebliche Kernaufgabe wahrgenommen wird, stand bei der Kontaktaufnahme mit den möglicherweise geeigneten Praxispartnern als zentrale Frage der jeweilige konkrete betriebliche Nutzen im Mittelpunkt.

Wird Nachhaltigkeit (auch) als betriebliches Modernisierungsprojekt verstanden, verschiebt sich der Stellenwert in der betrieblichen Wahrnehmung allerdings nur dann, wenn die jeweiligen Modernisierungsdefizite und die möglichen Lösungs-/Entwicklungspfade konkret beschrieben werden können. Da eine strukturelle Modernisierung (und um diese handelt es sich bei dem Nachhaltigkeitsansatz unzweifelhaft) unmittelbar an der jeweiligen einzelbetrieblichen Realität ansetzen muß, ist die „Vorabdefinition“ eines solchen Nutzens ohne intime Betriebskenntnisse kaum leistbar.

Zusätzlich spielen naturgemäß auch die auf den ersten Blick sehr verschiedenen Zeithorizonte der einzelwirtschaftlichen Akteure (Betriebe) und des eher strategischen „Nachhaltigkeitsprojektes“ sowie die Fokussierung vieler betrieblicher Akteure auf unmittelbar ökonomische Aspekte eine wichtige Rolle.

Das skizzierte Dilemma konnte in den meisten Fällen durch das Schnüren eines „Aktivitätenbündels“ gelöst werden. In dieses Bündel wurden einerseits konkrete vergleichsweise einfache betriebliche Verbesserungsmaßnahmen aufgenommen, von denen die wissenschaftlichen Partner aus Referenzerfahrungen wußten, dass sie mit hoher Erfolgsaussicht kurzfristig realisierbar sind (z.B. Senkung der Entsorgungskosten durch optimierte Getrennthaltungsstrategien). Auf der anderen Seite wurden die weitergehenden Prüfungen eher strategisch ausgerichteter Maßnahmen als zweiter Umsetzungsschritt anvisiert.

### **Klare Rollendefinition**

Eng verknüpft mit der Definition des betrieblichen Nutzens (siehe oben) ist auch die Definition der Rolle des Praxispartners. Neben der Realisierung des „Nutzens“ und den daraus resultierenden Erfahrungen kann diese Rolle durchaus auch einen komplementären Charakter besitzen. Lax formuliert: Wir helfen euch dieses konkrete Problem zu lösen, dafür steht ihr uns als Partner für die Diskussion jener weiterführenden noch weniger konkretisierter Themenstellungen zur Verfügung.

Diese deutliche Rollendefinition ist u.a. auch schon deshalb notwendig, da z.B. für eine produktionstechnische Veränderung andere betriebliche Kontaktpersonen und Ansprechpartner benötigt werden als z.B. für veränderte Marketingstrategien im Rahmen einer verstärkten Dienstleistungsorientierung.

Ein solcher innerbetrieblicher Themen- und damit Akteurswechsel erweist sich in einigen Fällen allerdings ebenfalls als nicht unproblematisch. Denn die meisten nachhaltigkeitsorientierten Modernisierungsmaßnahmen sind klassische Querschnittsanforderungen, die quer über tradierte Aufgabenteilungen und Abteilungszuständigkeiten angegangen werden müssen. Hier erweisen sich Beharrungsvermögen vieler Beteiligter und Abteilungsrivalitäten als unverändert hohe Hürden für die zügige Realisierung von Veränderungen.

## **Schrittweises Vorgehen**

Wie ausgeführt, braucht der Kooperationsaufbau neben klar definierten Zielen und Aufgabenteilungen wie die meisten sozialen Prozesse vor allen Dingen Zeit. Diesem Aspekt kann durch einen schrittweisen Ausbau der Kooperation Rechnung getragen werden:

1. Kontaktaufnahme
2. 'Face to face'-Dialog
3. Bilaterale Kooperation zu einem konkreten Teilthema
4. Innerbetriebliche Präsentation des Teilprojekterfolges und Diskussion über weiterführende Kooperationsmöglichkeiten
5. Weitere Kooperation, nach Möglichkeit in stärker vernetzten betrieblichen Feldern.

Insbesondere die innerbetriebliche „Erfolgsstory“ ist dabei der zentrale Aspekt, der weiterführende Kooperationen fördert. Bereits bei der Bearbeitung eines ersten konkreten Kooperationsprojektes müssen unter Wahrung der verschiedensten Befindlichkeiten die entsprechenden innerbetrieblichen Kontakte aufgebaut werden, die dann wiederum zu anderen Fragestellungen und Untersuchungsmöglichkeiten führen.

## **4.3 Erfolgskriterien**

Die thematischen Zugänge wurden wie oben erwähnt durch vier verschiedene Blickwinkel (Bezüge) strukturiert. Innerhalb dieser Bezüge wurde in der ersten Phase des Projektes in einem Scopingverfahren die im Sinne der Projektstellung relevanten Teilprojekte identifiziert und nach ihren Erfolgspotentialen untersucht. Sie sind in der Tabelle 1 aufgeführt und teilweise in Kapitel 5 beschrieben. Dieses Vorgehen ergab eine hohe Anzahl von möglichen Teilprojekten, die auf eine handhabbare und bearbeitbare Menge reduziert werden mußte. Die Vielzahl und Komplexität der Bewertungsdimensionen machte es notwendig, ein Kriterienraster für die Rangfolge und damit für die Auswahl zu entwickeln. In Tabelle 1 ist der Diskussionsstand der Bewertungskriterien dargestellt.

Bewertungskriterien	Gesamtidee	Stellung Endbericht	Theoretischer Bezug	Umberto-Modell	Über-/Zwischenbetriebl. Kooperation	Realisierbarkeit	Innovation Inhalte	Innovation Methoden	Übertragbar repräsentativ	Nachhaltigkeit	Aufwand	Zugang	Kompetenz
<b>Teilprojekte</b>													
<b>Stoffstrom-Ansatz</b>													
Ansätze für höherwertige Stahlkreisläufe (1: Legierungen)	A			A	A	C	B		A			C	A
Ansätze für höherwertige Stahlkreisläufe (2: gelöste Störstoffe)	A			A	A	C	B		A			C	A
Bewertung von Schleifschlammrecycling-Alternativen													
Möglichkeiten für ein hochwertiges Strahlmittelrecycling													
Möglichkeiten für einen optimierten Kupfer-Kreislauf													
Analyse der Aluminiumproduktion und –weiterverarbeitung													
Überbetriebliche Stahl- und Kupferstoffströme (analog Aluminium)													
<b>Prozeß-Ansatz</b>													
Optimierung der Kühlschmierung bei der spanenden Metallbearbeitung													
Optimierte Ausschleusung anhaftender Störstoffe	A/B			A	A	C	B		A			C	A
Gezielte Identifikation von prozeßbezogenen Optimierungspotentialen durch Materialfluß-Controlling Systeme													
<b>Räumlicher Ansatz</b>													
Innovationsförderung durch räumliche Nähe													
<b>Produkt-Ansatz</b>													
Flotten- und Gerätemanagement als Ansätze zur Dienstleistungsorientierung von Produktionsunternehmen													
Produkt- und Komponentenrecycling (-börse)													
Modulbauweise als standortsichernde Innovationsstrategie													
Verringerung des Stahlverbrauchs durch Optimierung der Stahlmenge pro Produkt													
Bedarfsorientierte Ausdifferenzierung von Begleitstoffgehalten in Kupferprodukten													

Tab. 1: Bewertungskriterien

Die erste Kategorie der Kriterien bezieht sich auf die **inhaltlichen** Aspekte, durch die Kategorie **Extern** wird die Außenwirkung der Teilprojekte einbezogen, wogegen die Kategorie **Intern** praktische Aspekte bei der Bearbeitung berücksichtigt. Die Bedeutung der einzelnen Kriterien wurde folgendermaßen diskutiert:

**Inhaltlich**

- Gesamtidee: Wie gut passt das Teilprojekt in die Gesamtidee des Projektes?
- Stellung Endbericht: Wie notwendig ist das Teilprojekt für das gesamte Projekt? Ergänzt es nur ein übergeordnetes Teilprojekt, oder würde im Endbericht eine inhaltliche Lücke klaffen, wenn es nicht bearbeitet würde?
- Theoretischer Bezug: Wird das Teilprojekt durch unsere bisherigen theoretischen und methodischen Arbeiten gestützt? Oder macht es ein neues Feld auf?
- Umberto-Modell: Ist das Teilprojekt geeignet, um in einem Stoffstromnetzmodell abgebildet zu sein? (Kriterien wie dieses müssen auf einige aber nicht auf alle Teilprojekte zutreffen)
- Über-/Zwischenbetriebliche Kooperation: Ist das Teilprojekt geeignet, um über- oder zwischenbetriebliche Kooperation zu initiieren oder zu stabilisieren?

## **Extern**

- Realisierbarkeit: Wie wird die Realisierbarkeit eingeschätzt?
- Innovation Inhalte: Wie innovativ ist der Themenbereich des Teilprojekts?
- Innovation Methoden: Wie innovativ sind die angewendeten Methoden beim Teilprojekt?
- Übertragbar, repräsentativ: Wie übertragbar sind die erwarteten Ergebnisse für andere Regionen, Branchen oder Stoffarten?
- Nachhaltigkeit: Welchen Beitrag leisten die erwarteten Ergebnisse zum nachhaltigen Wirtschaften?

## **Intern**

- Aufwand: Wie groß ist der personelle Aufwand zur Bearbeitung der Teilprojekte?
- Zugang: Wie gut wird/ist der Kontakt zu den beteiligten Unternehmen, ist er intensivierbar, bzw. wie leicht ist er vermutlich herstellbar?
- Kompetenz: Wie hoch schätzen wir die projektgruppeninterne Kompetenz zur Bearbeitung des Teilprojekts ein?

Das weitere Vorgehen war folgendermaßen gedacht: Die aufgelisteten Teilprojekte sollten in einer ABC-Einstufung bewertet werden. In der ersten Phase sollte eine (horizontale) Bewertung für jedes Teilprojekt durchgeführt werden, welche im zweiten Schritt im vertikalen Durchgang überarbeitet wird, um so die Teilprojekte in den einzelnen Kategorien gegeneinander zu gewichten. In der dritten Phase ist dann horizontal die innere Stimmigkeit der einzelnen Teilprojektbewertung zu betrachten. Die Erstellung der Gesamtbewertung und Rangordnung der Teilprojekte sollte nach der ABC-Zuordnung im Diskurs erfolgen, da ein Aufsummieren oder Auszählen wegen der unklaren Gewichtung der Kriterien nicht möglich, aber auch nicht nötig war. Das Ziel der Methode sollten übersichtliche und transparente Kriterien und ein Konsens der Wertungen sein. Die Gewichtung der Kriterien brauchte dafür nicht formalisiert zu werden, da sie sich aus der Diskussion ergab.

So weit die methodischen Überlegungen, in der Praxis zeigte sich jedoch, dass die Diskussion der Kriterien und die Einteilung nur einiger Teilprojekte ausreichte, um eine Verständigung über die Rangfolge zu erreichen. Der gesamte Diskussionsprozess hat somit viel zu der internen Verständigung und Stimmigkeit in der Projektplanung beigetragen, obwohl er nicht formal durchgeführt wurde.

Die Teilprojekte, die in der Folge dieses Ausleseprozesses bearbeitet werden, sind in Kapitel 5 näher beschrieben.

## **4.4 Stoffstrommodellierung mit Umberto**

### **4.4.1 Grundlagen der Modellbildung**

Ein Modell ist eine Abstraktion und ein Konstrukt, es kann der Abbildung von Aspekten der Realität dienen. Modelle werden mit spezifischen Annahmen und Vereinfachungen für einen bestimmten Zweck erstellt und sind in der Regel auch nur für die Erfüllung dieses Zweckes geeignet (Stachowiak 1997, S. 131). Eine Straßenkarte z. B. ist ein Modell für die Wege in diesem Kartenausschnitt, sie dient zur Orientierung und hilft, auf dem gewünschten Weg zum gewünschten Ort zu kommen. Über die Beschaffenheit der Landschaft oder der Straßenoberfläche macht sie keine Aussage. Nicht einmal die Propor-

tionen im zwei-dimensionalen Maßstab stimmen, wenn man z.B. die Straßenbreite in der Karte mit der Realität vergleicht.

Modelle lassen sich grundsätzlich nach ihren Funktionen einteilen. **Beschreibungsmodelle** sollen den tatsächlichen Sachverhalt des Realitätsausschnitts abbilden, sie dienen zur Beschreibung der relevanten Sachverhalte. In **Erklärungsmodellen** wird dagegen die Realität derart abgebildet, vereinfacht und strukturiert, dass durch die Betrachtung des Modells die Wirklichkeit besser verstanden werden kann. Durch **Entscheidungsmodelle** wird versucht, die für wesentlich gehaltenen Elemente eines Problems so zu strukturieren, dass die Problemlösung als logische Schlussfolgerung davon abgeleitet werden kann (Reichmann 1985, S. 48). Für das Stoffstrommanagement sind alle drei Funktionen relevant. Es interessiert sowohl die Beschreibung des Ist-Zustandes der Stoff- und Energieströme, als auch die erklärenden Informationen, z. B. wodurch welche Umweltwirkungen verursacht werden und schließlich auch die Entscheidungsunterstützung für erkannte Problemlagen. Letzteres wäre mit Hilfe der Szenarienmethode erreichbar, indem im Sinne einer „was-passiert-dann-Maschine“ (Grobi 1982. In: Sesamstraße. Folge 1638) die Folgen für verschiedene Handlungsoptionen dargestellt werden. Insgesamt werden also an die Modellierungsmethode für Stoffströme vielseitige Anforderungen gestellt.

Die Berücksichtigung der Zeit ist eine weitere Unterscheidungsart von Modellen. Ein Schiffsmodell ist eine statische Momentaufnahme des realen Gegenstands, kann aber in einer dynamischen Modellumgebung, z. B. in einem Strömungskanal eingesetzt werden. Eine periodenbezogene Modellierung wird häufig in Stoffstromnetzen angewendet, indem Input- und Outputströme, sowie Bestandsänderungen für eine bestimmte Periode, z. B. ein Jahr, berechnet werden. In unserer Erfahrungswelt ist jedoch die Zeit eine nicht veränder- oder gar umkehrbare Einflussgröße. Zeitkontinuierliche Vorgänge werden daher auch in Modellen abgebildet. Man spricht dann von Simulation. Streng genommen sind alle Computersimulationsmodelle zeitdiskrete Modelle, da digitale Computer immer in Schritten arbeiten. Die Schrittgröße kann jedoch im Vergleich zur Änderungsdynamik der Modelle extrem klein sein. Daher wird bei der Computersimulation von kontinuierlicher Simulation kontinuierlicher Systeme gesprochen (Bossel 1994, S. 38).

Das Spektrum dynamischer Systeme und Modelle ist nach Bossel (1994, S. 37):

- systemerklärend ↔ verhaltensbeschreibend
- Realparameter ↔ Parameteranpassung
- deterministisch ↔ stochastisch
- zeitinvariant ↔ zeitvariant
- zeitkontinuierlich ↔ zeitdiskret
- raumdiskret ↔ raumkontinuierlich
- exogen getrieben ↔ autonom
- numerisch ↔ nicht-numerisch

Die Art der Modellierung in unserem Projekt wird eher mit Begriffen der linken Seite der Aufstellung charakterisiert. Wir brauchen systemerklärende Modelle, da wir in die Wirkstruktur eingreifen wollen, um ggf. unterstützt durch Szenarien eine Optimierung der Stoffströme und Kosten zu erreichen. Dazu müssen wir weitgehend die real vorkommenden Parameter der Prozessbeschreibungen nutzen und sollten sie nur in Einzelfällen

durch z.B. In-Output-Verhältnisse ermitteln. Da wir mit periodenbezogenen Bilanzierungen rechnen, sind auch die Modelle *deterministisch* und *zeitinvariant*, d.h., dass das Modell mit den gleichen Startwerten die gleichen Ausgabewerte liefert. Ob wir bei einer zeitdiskreten und raumdiskreten Modellierung bleiben können, wird sich zeigen. Zur Zeit reicht für unsere Zwecke die periodenbezogene Modellierung, bei der die Struktur des Raumes nur in Form einer festen Größe als Transportentfernung vorkommt. Reizvoll wäre der Gedanke, z.B. die weltweiten Kupferströme zu simulieren, bei der Orte und Höhe des Verbrauchs, die Lagerstätten, deren Ausbeute und Reichweite und natürlich die Kosten über 10, 50, 100 Jahre dargestellt werden. Doch ist das nicht unsere Aufgabe im Projekt. Die Systeme, die wir modellieren, sind stark von ihrer Umgebung abhängig und daher exogen, und die Aspekte, die wir modellieren, sind in erster Linie auch quantitativ, d.h. numerisch erfassbar. Natürlich werden wir auch qualitative Aspekte des Stoffstrommanagements berücksichtigen, doch werden wir diese nur begrenzt in das Stoffstromnetz einfließen lassen können.

#### 4.4.2 Stoffstromanalysen/-bilanzen

Beim Stoffstrommanagement<sup>30</sup> werden zahlreiche Instrumente und Methoden verwendet, die in ähnlicher Form auch bei anderen Management- oder Controllingaufgaben eingesetzt werden. Das Controlling erfüllt als Subsystem des Managements Koordinations- und Informationsfunktionen, die eine wichtige Voraussetzung für die Steuerungsfunktion bilden (Meffert 1998, S. 412ff). Über das Controlling können dabei auch Informationen erfasst und verarbeitet werden, die einen spezifischen Umweltbezug haben, wie z. B. Energieverbräuche oder Abfallaufkommen. Diese Bereiche, die in der betrieblichen Praxis ins Controlling integriert werden können, werden Ökocontrolling genannt. Instrumente zur Informationsbeschaffung sind dabei z.B. Input/Output Bilanzen der Stoff- und Energieströme, die Stoffstromanalysen oder Ökobilanzen.

Die Input/Output Bilanz erfasst nur die Stoffmengen, die die Bilanzgrenzen, d.h. meist die Betriebsgrenzen, überschreiten. Der Betrieb wird somit als Blackbox betrachtet, so dass Aussagen über die Struktur der internen Stoffumsätze oder auch Änderungen in den Lagerbeständen nicht getroffen werden können. Mit Hilfe von Stoffstromanalysen ist es dagegen möglich, die einzelnen Prozesse der Stoff- und Energieumsetzungen und die Bestände der Lager zu modellieren und auszuwerten. Allerdings sind die Informationsarten der Stoffstromanalyse häufig auf Stoffe und Energien beschränkt. Umweltbelastungen wie z. B. Lärm, radioaktive Strahlung oder Flächenverbrauch lassen sich nur schwer abbilden. Besser geeignet ist dafür die Ökobilanz, welche als Produktökobilanz besonders auf den Vergleich von Produktalternativen spezialisiert ist. Ihr Stärke hat die Ökobilanz allerdings durch weitgehend separate Bearbeitungsphasen: Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsbilanz und Auswertung, wie dies in der Normungsreihe ISO 14 04X beschrieben ist (ISO 1404x). Zur Erstellung der Sachbilanz, der zweiten Phase der Ökobilanz, wird häufig die Stoffstromanalyse eingesetzt.

Ein anderes Instrument des Controllings ist die Kostenrechnung. In ihr werden die Kosten i.d.R. in Form einer Kostenleistungsrechnung nach Kostenarten (Wofür wurde Geld ausgegeben?), Kostenstellen (Wo im Betrieb sind die Kosten angefallen?) und Kostenträger (Durch welche Produkte/ Leistungen sind die Kosten entstanden?) unterschieden. Für die Fokussierung auf Kosten, die einen Umweltbezug haben, wurde der Begriff Umweltkostenrechnung geprägt. In der Umweltkostenrechnung werden (betriebliche) Aufwendungen für umweltrelevante Kostenarten erfasst, so dass z.B. die Kosten für die Abfallentsorgung nicht als Gemeinkosten auf alle Produkte/Leistungen umgelegt werden, sondern spezifisch auf die jeweiligen Produkte bezogen werden können.

---

<sup>30</sup> Unter dem Begriff Stoffströme sind im Folgenden auch Energieströme gemeint.



In unserem Projekt wird für das Stoffstrommanagement als Instrument die Stoffstromanalyse mit der Methode der Stoffstromnetze angewendet und weiterentwickelt. Ziel ist es, die Stoffströme, die im Fokus der Teilprojekte stehen, in Stoffstromnetzen abzubilden. Zusätzlich werden auch Informationen der (Umwelt-)Kostenrechnung in die Modelle einfließen. Diese Beschreibungsmodelle enthalten wegen der verwendeten Stoffstromnetz-methode auch weitergehende Strukturinformation und entsprechende Darstellungsarten, so dass sie auch zum tiefergehenden Verständnis von Abhängigkeiten und Wirkungszusammenhängen der Stoffströme genutzt werden können. Mit diesem Systemverständnis und einer (außerhalb des Instrumentes vorgenommenen) Bewertung der Stoffströme ist es nun möglich, Optimierungsziele zu formulieren. Durch gezielte Änderungen des Modells können dann Szenarien entwickelt werden, die sich an den Optimierungszielen orientieren. Stellschrauben im Modell für diese Änderungen sind die Parameteränderungen bei den modellierten Prozessen, die Substitution von Stoffen oder auch ganzer Prozessarten. Beispiele sind (entsprechend der obigen Reihenfolge): höherer Auslastungsgrad bei Transporten, der Einsatz von PE-Kunststoff statt PVC oder die Verwendung von Spezial-Maschinen mit Minimalmengenschmierung bei der spanabhebenden Bearbeitung.

#### 4.4.3 Die Stoffstromnetz-methode

Die Stoffstromnetz-methode macht sich die Systematik von Petrinetzen zu Nutze. Es gibt drei elementare Symbole: die **Stellen** für Input- und Outputsystemgrenzen, Bestandslager und Verbindungspunkte, die **Transitionen**, in denen die Stoffumsetzungen erfolgen, und die **Verbindungen** oder „Kanten“, die die Pfade der Stoff- und Energieströme zeigen (Möller, Rolf 1995 in Schmidt S. 39f).

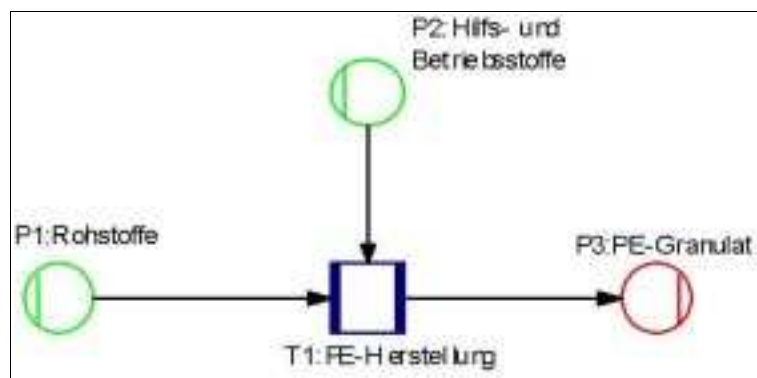
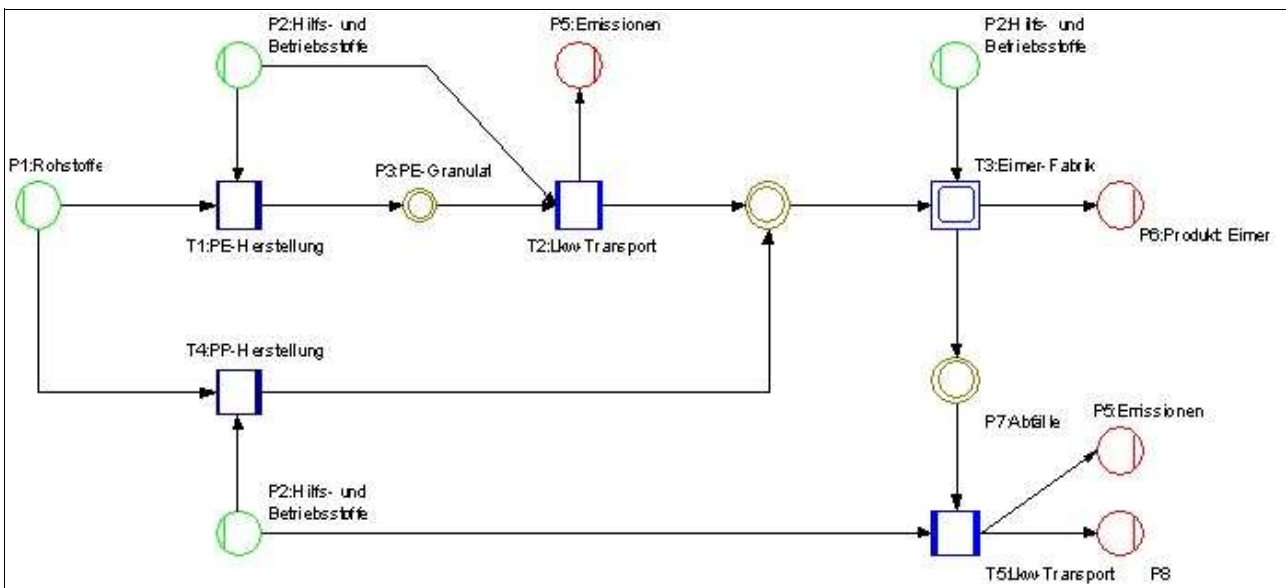


Abb. 11: Ein einfaches Stoffstromnetz

Abbildung 11 zeigt ein einfaches Stoffstromnetz der PE-Herstellung. Die Inputströme sind die Roh- sowie die Hilfs- und Betriebsstoffe, der Output ist das gewünschte Produkt PE-Granulat. In der Transition ist der Prozess der Stoffumsetzung mathematisch beschrieben. Dieses Modell kann Aussagen zu Stoff- und Energieverbrauch pro Produkt machen, aber auch – und das ist das besondere an der Methode – z.B. für eine vorgegebene Menge an Energie die produzierbare Menge an PE-Granulat ausrechnen. Stoffstromnetze können also nicht nur in der verfahrenstechnisch-logischen Flussrichtung berechnet werden, sondern auch rückwärts. Voraussetzung ist allerdings, dass die mathematische Beschreibung der Transitionen entsprechend rekursiv aufgebaut ist. Keine Aussagen kann dieses einfache Modell jedoch zu den Emissionen bei der PE-Herstellung machen, genauso wie die Stoffflüsse bei der Energiebereitstellung oder die Transportaufwendungen der Rohstoffe nicht berücksichtigt sind. Dies liegt nicht an einer methodischen

Beschränkung oder an mangelnder Datengrundlage, sondern daran, dass für den Zweck der Modellierung, d.h. das was der Modellierer mit dem Modell ursprünglich erreichen wollte, diese Informationen unnötig waren und daher aus Effizienzgründen nicht modelliert wurden. Bei einem so einfachen Netz liegt dies auf der Hand. Bei größeren Netzen, die aus hunderten von Transitionen und Stellen bestehen können, ist es wichtig, sowohl bei der Modellierung, als auch bei der Verwendung des Modells den genauen ursprünglichen Zweck der Modellierung vor Augen zu haben. Als Beispiel ist in Abbildung 12 ein umfangreicheres Netz dargestellt, in dem Stellen auch als Lager oder Verbindungspunkte zu finden sind. Auf der rechten Seite ist zudem in der Transition „T3:Eimer-Fabrik“ ein Subnetz untergeordnet. Durch eine solche Hierarchisierung ist es möglich, auch umfangreiche Netze übersichtlich darzustellen.

Abb. 12: Hierarchisierung von Stoffstromnetzen

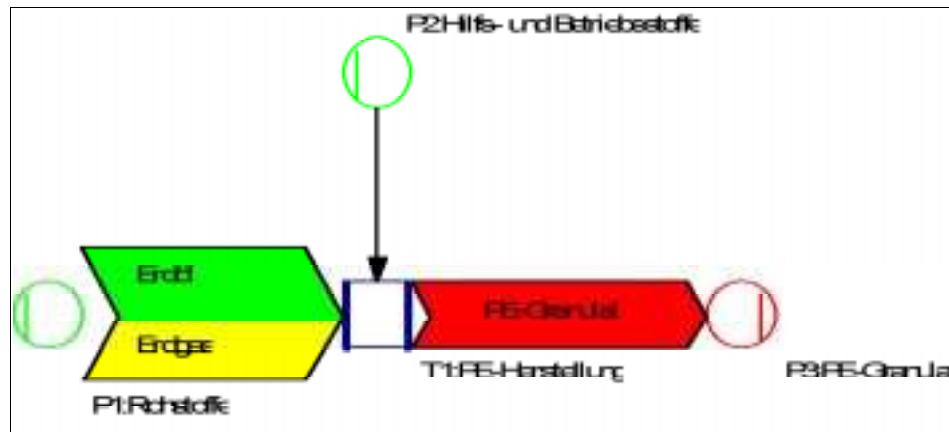


Die physikalischen Basiseinheiten sind für die Stoffmenge das Gewicht in Kilogramm und für die Energie das Kilojoule. Andere Einheiten wie z.B. Stück sind frei definierbar. Seit der grundlegenden Arbeit von Andreas Möller sind die Stoffstromnetze um die Fähigkeit der (Umwelt-) Kostenrechnung erweitert worden. Es ist nun möglich, Kostenarten, -stellen und -träger zu definieren, d.h. Material, Lohn und Maschinenkosten den Prozessen zu zuordnen und auszuwerten. (Möller 1999, S. 148ff.) Damit kann die periodenbezogene Stoffstromanalyse die Grundlage bilden, für eine verursachungsgerechte Zuordnung des stofflichen und monetären Aufwandes zu den Leistungen des Wertschöpfungs-systems (Möller 1999, S. 145).

#### 4.4.4 Auswertung

Die einfachste Aufwertungsmöglichkeit der Stoffstromnetze ist die tabellarische Gegenüberstellung der In- und Outputdaten und Bestände, geordnet z.B. nach Stellen oder Materialarten. Diese Daten können auch in Form von Balken-, Torten- oder Linien-diagrammen in verschiedenen Farben und Formen dargestellt werden. Interessant ist auch die Möglichkeit der Darstellung in Sankeydiagrammen (Abbildung 13).

Abb. 13: Sankeydiagramm



### Einsatz und Ausblick im Projekt

Bisher wurden Stoffstromnetze nur zur übersichtlichen Darstellung von Stoffströmen genutzt und nicht für weitergehende Bilanzierungen oder Szenarien. So wurden z.B. die Mengen der Edelstahlproduktion, -verwendung und -recycling in Deutschland dargestellt, um durch Berechnungen von Fehlmengen den Verlust von Chrom und Nickel beim Down-cycling in minderwertigen Baustahl abzuschätzen.

Der weitere Verlauf des Projektes wird zeigen, inwieweit dieses Instrument tatsächlich mit den oben skizzierten Möglichkeiten verwendet werden kann. Bisher wurden Stoffstromanalysen und Stoffstromnetze nicht in dem Umfang eingesetzt, wie dies im Antrag geplant war. Grund sind die sich anders als vorgesehen entwickelnden Unternehmenskontakte, bei denen es wichtig ist, durch persönlichen Kontakt Vertrauen aufzubauen. Die Vermutung, dass die Unternehmen ein starkes Eigeninteresse haben, eine Analyse von wichtigen betrieblichen und überbetrieblichen Stoff- und Energieströmen zu bekommen, hat sich nicht bestätigt. Im weiteren Projektverlauf rechnen wir damit, dass die Stoffstromnetze zum einen eingesetzt werden für die einfache und übersichtliche Darstellung von Stoffströmen und zum anderen für spezielle Modellierungsaufgaben, bei denen die Komplexität der Zusammenhänge eine Computerunterstützung der Modellierung und Szenarienrechnung sinnvoll macht.

Ein konkretes Anwendungsfeld ist dabei die Modellierung der vielfältigen Stoffströme und Kosten beim Produkt- und Komponentenrecycling. In diesem Zusammenhang soll auch geprüft werden, inwieweit die Kopplung von periodenbezogenen Modellierungen mit zeitkontinuierlichen Simulationen notwendig ist, um z.B. Aufwendungen und Lebensdauer von aufbereiteten Komponenten zu modellieren.

In welcher Art die Unternehmenskontakte für dieses Arbeitsfeld ausgebaut werden können, wird erst nach dem geplanten Workshop zum Produkt- und Komponentenrecycling absehbar sein (Juni 2000). Impulse für die Methodenentwicklung werden auch von dem Workshop im Mai 2000 erwartet, bei dem die verschiedenen Modellierungserfahrungen der vom BMBF geförderten Projekte zum regionalen Stoffstrommanagement in Hamburg vorgestellt und diskutiert werden.

## 5 Umsetzungsprojekte

In diesem Kapitel werden die Teilprojekte vorgestellt, die derzeit im Rahmen dieses Forschungsvorhabens exemplarisch bearbeitet werden. Bei den stoffstromorientierten Ansätzen (Stoffstrombezug) sind dies die Metalle Kupfer und Stahl. Beim Metallstoffstrom Aluminium ist der Unternehmenszugang noch ungeklärt und konkrete Ansatzpunkte sind damit noch offen (die weitere Bearbeitung hängt vom Fortschritt der anderen Teilprojekte ab).

Zu den prozessorientierten Ansätzen (Prozessbezug) gehören das Schleifschlammrecycling, die Strahlmittelabfälle und die optimierte Kühlschmierung bei der Metallbearbeitung. Die Produkt(ions)strategien umfassen die Modulbauweise, das Anlagen- und Komponentenrecycling und Flottenmanagement / Leasingkonzepte.

### 5.1 Stoffstromorientierte Ansätze

#### 5.1.1 Kupfer

##### 5.1.1.1 Elementeigenschaften, Vorkommen und Abbau

Kupfer ist ein rötlich glänzendes Metall mit der Ordnungszahl 29 und einem Atomgewicht von 63,5 g/mol. Es ist korrosionsbeständig und reagiert besonders intensiv mit schwefelhaltigen Substanzen. Kupfer ist mit 50ppm oder 0,005% am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Es liegt in verschiedenen mineralischen Formationen vor, wobei lediglich sulfidische und einige oxidische Erze mit Kupfergehalten von wirtschaftlicher Bedeutung sind. Dies sind z.B. Kupferkies ( $\text{CuFeS}_2$ ), Buntkupferkies ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), Kupferglanz ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ).

1995 wurden die abbauwürdigen Weltvorräte an Kupfer auf 340 Mio. t (Kupferinhalt) geschätzt (derzeitiger Abbau bis 0,5% Kupfergehalt) (Münster, 1997, S. 74ff). Insgesamt werden die Kupferressourcen auf weltweit 650 Mio. t Kupfer geschätzt. Die geförderten Erze enthalten im Durchschnitt nur 1% Kupfer, reiche Erze mit 4% Kupfer-Gehalt sind Ausnahmen. Bei konstant bleibender weltweiter Abbaumenge reichen die heutzutage als abbaubar bezeichneten Kupfervorräte noch etwa 30 Jahre, bei Förderung aller verfügbaren Ressourcen noch etwa 60 Jahre (U.S. Geological Survey, Minerals Information, 1999, S. 56ff).

Tab. 2: Abbauwürdige Kupfervorkommen und Bergwerksproduktion nach Ländern

Land	Vorkommen (1.000 t)	Abbau in 1997 (1.000 t)
Chile	88.000	3.390
USA	45.000	1.940
Polen	20.000	414
Rußland	20.000	505
Indonesien	19.000	529
Peru	19.000	491
China	18.000	414
Mexiko	15.000	391

Kasachstan	14.000	316
Andere	79.000	3.005
Welt	340.000	11.400

(U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Copper, January 1999)

Deutschland importierte 1998 rund 605.000 t Kupferkonzentrat mit einem Kupferinhalt von ca. 184.000 t. Hauptlieferländer waren Chile, Portugal und Argentinien. Des weiteren wurden etwa 300.000 t Rohkupfer und Kupferschrott importiert. Zusammen mit dem inländischen Schrottaufkommen wurden daraus 696.000 t Raffinadekupfer produziert, was Deutschland weltweit zum 5. größten Produzenten macht. Demgegenüber stand ein erheblich höherer Verbrauch von ca. 1,14 Mio. t Raffinadekupfer im gleichen Jahr (BGR 1999, S. 3-5).

### **5.1.1.2 Kupferprozesskette**

Kupfererze werden sowohl im Tage- als auch im Untertagebau abgebaut. Die Erze werden durch Brechen und Mahlen aufbereitet und die sulfidischen Erze durch Flotation aufkonzentriert. In den Erzkonzentraten liegt der Kupfergehalt zwischen 25 und 35%. Für die Produktion von Primär-Kupfer sind zwei Verfahrensschritte notwendig: 1. die in der Hauptsache pyrometallurgische Verhüttung der Kupferkonzentrate zu unraffiniertem Kupfer (98% Cu) und die vorwiegend elektrolytische Raffination zu Kathodenkupfer mit Cu-Gehalten > 99,99%.

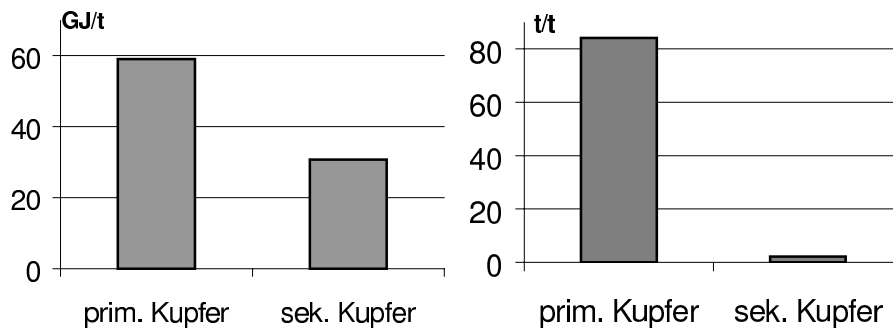
Kupfer kann auch aus Schrotten gewonnen werden, wobei die Kupfergehalte der Einsatzstoffe zwischen 5 und 90% schwanken. Die Sekundärrohstoffe werden mit Koks reduzierend eingeschmolzen, die meisten Begleitmetalle verflüchtigen sich und werden als Oxide aus dem Abgas abgeschieden. Die Schmelze wird verblasen und danach pyrometallurgisch raffiniert (Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 1999, S. 75ff).

Weltweit wurden 1996 12,6 Mio. t Kupfer produziert, davon 1,88 Mio. t aus Sekundärrohstoffen, das ist ein Anteil von knapp 15%. In der Bundesrepublik ist der Anteil an Sekundärkupfer mit 0,36 Mio. t (ca. 54% des Verbrauches) von insgesamt 0,67 Mio. t Kupfer weitaus höher (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 1999, S. 56ff).

### **5.1.1.3 Kumulierter Energieaufwand und Materialfluß**

Für die Produktion von einer Tonne Primärkupfer (inkl. Konzentratherstellung) werden in Deutschland durchschnittlich 59,0 GJ Energie aufgewendet und 84,1 t Material bewegt. Die Kupfergewinnung aus Sekundärrohstoffen ist mit 30,7 MJ/t und einem Materialfluß von nur 2,12 t/t weitaus ressourcenschonender. Es zeigt sich hier, dass die besonders energie- und stoffstromintensiven Prozesse zum großen Teil beim Erzabbau und der Konzentratgewinnung liegen. Die Verarbeitung von Kupfer zu Kupfer-Halbzeugen erfordert zusätzlichen Energieinput zwischen 9,2 MJ/t bei Draht 0,6 mm und 37,2 MJ/t für lackierten Draht 0,06 mm. Die folgende Abbildung zeigt KEA und Materialbedarf zur Erzeugung von Primär- und Sekundärkupfer.

Abb. 14: KEA und Materialverbrauch Kupfer



(Forschungsstelle für Energiewirtschaft 1999)

#### 5.1.1.4 Problemstellung und Ansätze für eine nachhaltige Kupferwirtschaft

Im Unterschied zur Situation in der Stahlkette ist die Qualität des Produktes nicht das wesentliche Problem in der Kupferkette. Durch den Verfahrensschritt der Elektrolyse am Ende des Hüttenprozesses können annähernd alle noch verbliebenen problematischen Begleitstoffe und Legierungselemente aus dem Endprodukt eliminiert und auch als z. T. wertvolle Rohstoffe wiedergewonnen werden. Hier muss also nicht mit Frischware verdünnt werden, um bestimmte Anforderungen an Produktreinheiten einhalten zu können. Dies sind - ebenso wie die heute in Deutschland schon erreichte Rate von ca. 50% Schrotteinsatz bei der Kupferherstellung - vergleichsweise gute Voraussetzungen für nachhaltiges Wirtschaften.

Wenn wir unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ein mehrfaches Recycling anstreben, spielt allerdings der Aufwand für das Recycling eine mindestens ebenso wichtige Rolle, wie der für den Bergbau und die Produktion von Primärkupfer. Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) gibt für die Herstellung von Primär- und Sekundär-Kupfer folgende Energie- und Materialverbräuche an:

Tab. 3: Material- und Energieverbräuche für die Herstellung von Kupfer

	Primärkupfer	Sekundärkupfer
<b>Herstellung Kupferkonzentrat</b>		
Energie	14.-15.000 MJ/t	
Bergematerial	37-38 t/t Konzentrat	
<b>Herstellung Kupfer</b>		
Energie	41.-46.000 MJ/t	30.-32.000 MJ/t
Schwefelsäure	1,8 t/t	
Schlacke	1,1 t/t	530 kg/t
Säureschlamm	1 kg/t	
Arsenfallprodukte	2 kg/t	
Nickelsulfat	10 kg/t	20 kg/t
Anodenschlamm	10 kg/t	10 kg/t
sonstige Reste		60 kg/t

Diese Zahlen zeigen, dass durch das Recycling von Kupferschrotten ca. 1/3 des Energieaufwandes (bezogen auf die gesamte Kette) und die großen, mit der Konzentratherstellung verbundenen Stoffströme (ca. 112 t Berge /t Kupfer<sup>31</sup>) vermieden werden können (Forschungsstelle für Energiewirtschaft 1999).

Doch auch der Recyclingprozess in der Kupferhütte ist vermutlich noch nicht optimal gestaltet und dürfte bezüglich des Stoff- und Energieaufwands noch deutliche Verbesserungsmöglichkeiten bieten und zwar wohl weniger in der Hütte selbst als in den davor liegenden Produktlebenszyklusstufen.

So wird die Höhe der Stoff- und Energieströme beim Recycling wesentlich vom Sortierungsgrad und der ‚Reinheit‘ des Schrotts bedingt. Von diesem Reinheitsgrad hängt z.B. ab, in welche Verarbeitungsstufe der Schrott eingebracht werden kann, beginnend - im schlechtesten Fall - beim Schwebeschmelzofen bis hin zum bestmöglichen Fall erst bei der Stranggussanlage. Bestimmte besonders problematische Verunreinigungen des Schrotts können auch der Grund für zusätzlichen Reinigungsaufwand (bzw. Schutzmaßnahmen) sein, z. B. bei Computerschrott, der halogenierte Flammschutzmittel enthält.

Der Recyclingprozess kann durch eine Abschätzung, oder - falls realisierbar eine Berechnung - der einsparbaren Aufwände (bzw. Entropieproduktion) gezielt analysiert und auf Verbesserungspotentiale untersucht werden. Mögliche Optionen, mit denen jeweils bestimmte Einspareffekte erzielt werden können, betreffen insbesondere die Vorkette und reichen (in je verschiedenen Zeithorizonten) von der verbesserten Separierung unterschiedlicher Schrottsorten bis zur recyclinggerechten Produktgestaltung. Wie weitgehend hier in der Projektlaufzeit schon Erfolge erzielt werden können, ist derzeit noch nicht abzusehen.

### **5.1.1.5 Regionale Akteure in der Stoffkette**

#### **Die Norddeutsche Affinerie**

Die Norddeutsche Affinerie AG wurde 1866 in Hamburg gegründet und ist heute mit einer Produktion von 370.000t Kupfer der größte Kupferproduzent in Europa. Jährlich werden ca. 700.000 t Erzkonzentrat mit durchschnittlichem Kupferanteil von 30% und über 150.000 t Sekundärmaterial (Kupferschrott 80.000 t, Elektronikschrott 1.200 t, externe Zwischenprodukte 86.000 t) verarbeitet.

Die mengenmäßig größten Anteile der NA-Produkte sind Schwefelsäure mit 660.000 t/a und Eisensilikatgestein mit 410.000 t/a. Kupferprodukte sind Kupferkathoden (364.000 t/a), Gießwalzdraht (320.000 t/a), Stranggussformate (176.000 t/a) und Metallpulver (5.000 t/a) Weiterhin werden chemische Produkte (Kupfersalze 6.500 t/a, Nickelsulfat 1.800 t/a), Edelmetalle (Gold 7,8 t/a, Silber 200 t/a, Platin 1-1,5 t/a und Palladium, Rhodium) und andere Metalle (u.a. Blei, Mischzinn, Selen) hergestellt. Die Kupferprodukte der NA weisen nur eine geringe Verarbeitungstiefe auf (Norddeutsche Affinerie, Gespräch Juli 1999).

Akteure aus dem Bereich Handel und Aufbereitung in der Region sind noch tiefergehend zu identifizieren und kontaktieren.

---

<sup>31</sup> Zur Herstellung von 1 t Kupfer werden ca. 3 t Kupferkonzentrat benötigt.

### **5.1.1.6 Konkrete Ansatzpunkte und Handlungsmöglichkeiten in der Region**

In den bisherigen Gesprächen konnte mit der Norddeutsche Affinerie eine sich intensivierende Kooperationsbeziehung aufgebaut werden. Die zunächst eher allgemeinen Fragestellungen konnten auf verschiedenen Ebenen konkretisiert werden.

#### **Entropiebilanzen und energetische (bzw. entropische) Optimierung bei der Affinerie**

Ein eher theoretisches Teilprojekt stellt ein Dissertationsvorhaben zu ‚Entropiebilanzen als Maß für Ressourceneffizienz‘ dar. Die ersten Berechnungen des Schwebeschmelzofens liegen vor und sollen schrittweise auf einen möglichst großen Teil der Hüttenprozesse ausgedehnt werden. Hierbei geht es zunächst darum, den Ansatz an einem praktischen Beispiel auf seine Durchführbarkeit zu testen. In der Zukunft sollte es dann möglich sein, mit dieser Methode verschiedene Werkstoffe hinsichtlich Herstellung und Recycling, oder später ggf. auch konkurrierende Technologiepfade der Kupfergewinnung (also z. B. einen metallurgischen Pfad mit einem Pfad, der ggf. auch auf biotechnologischen Teilschritten aufbaut) unter dem Aspekt der mit jedem Pfad verbundenen Entropieproduktion vergleichend zu bewerten.

Es ist davon auszugehen, dass die Optimierungspotentiale auf empirischem Wege, also durch die langjährige Erfahrungen der Mitarbeiter der Hütte, schon weitgehend ausgeschöpft sind. Trotzdem dürfte ein Vergleich der Ergebnisse des ökobilanziellen Zugangs (Quantitäten von Stoff- und Energieströmen) mit dem etwas qualitativeren entropischen Ansatz aufschlußreich sein. In diesem Zusammenhang ist interessant, dass die Affinerie derzeit selbst im Rahmen ihres internen Projekts ‚Energia‘ einen neuen Schub der energetischen Optimierung ansteuert. Eventuell lassen sich, auch wenn in diesem Bereich aufgrund des sehr strikten Vertrauensschutzes keine direkte Beteiligung von Projektmitarbeitern möglich ist, aus den gemachten Erfahrungen verallgemeinerbare Leitlinien bzw. Fokussierungen für andere Branchen des Metallsektors ableiten.

### **5.1.1.7 Weitere mögliche Handlungsfelder**

Zusätzlich zu diesen eher theorieorientierten Aktivitäten geht es wesentlich handfester um praktische Ansatzpunkte für eine nachhaltigkeitsorientierte Optimierung des Kupferkreislaufs. Unsere bisherigen Gespräche konzentrieren sich auf die im folgenden genannten Bereiche. Welche der Ideen weiter verfolgt werden kann, wird im Wesentlichen davon abhängen, welche Akteure sich wie engagiert beteiligen werden und welche projektinternen und projektexternen Ressourcen wir dafür mobilisieren können.

#### **Regionale Kupferkreisläufe?**

An sich ist die Affinerie natürlich ein typischer Global Player. Von hier aus werden weltweite Stoffströme, wenn nicht gesteuert, so doch maßgeblich beeinflusst. Trotzdem lohnt sich auch ein Blick auf die regionale Situation. Vielleicht können ja in der Region Ansätze für eine Optimierung von Kupferkreisläufen gefunden werden, die später auch auf viele andere Regionen übertragen werden können.

Die vielfältigen Einsatzstoffe und Verfahren der Affinerie ermöglichen eine hochwertige Verwertung unterschiedlicher metallischer bzw. metallhaltiger Wertstoffe. Eine mögliche Fragestellung in diesem Zusammenhang könnte im Fortgang des Projektes zum Beispiel sein, ob eventuell noch unausgeschöpfte Potentiale im Bereich edelmetallhaltiger Batterien und Akkus existieren, an denen die Affinerie auch ein ökonomisches Interesse hat.



Die Affinerie spielt durch ihre Möglichkeit, selbst aus den problematischsten Abfallströmen (z. B. Galvanikschlämme, Ätzlösungen usw.) noch wertvolle Rohstoffe zurückzugewinnen, auch eine wichtige Rolle als Senke von ‚Stoffströmen‘, die ansonsten teuer und unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten sehr unbefriedigend auf Sondermülldeponien verbracht werden müssten. Auch hier kann untersucht werden, ob diese Möglichkeiten in allen Unternehmen der Region angemessen berücksichtigt werden (bzw. ob ein Dialog zwischen diesen Unternehmen und der Affinerie bisher noch vorhandene Verwertungshemmnisse – die ja wiederum in der Vorkette liegen könnten - beseitigen könnte).

### **Elektronikschrott**

Elektronikschrott wird derzeit in Hamburg in größerem Umfang nur von Großanfallstellen, wie z.B. bei EDV-Anlagen großer Firmen systematisch erfasst. Als Grund ist hier vor allem der im Vergleich zu den potentiellen Erlösen hohe Kostenaufwand für die Sammlung und Demontage zu nennen.

Die administrative Betreuung der Sammelaktivitäten aus dem privaten Bereich erfolgt über die regionale Abfallwirtschaft begleitet u. a. durch die Umweltbehörde. Ein Teil der Erfassung wird derzeit von der Stadtreinigung Hamburg auf ihren Recyclinghöfen durchgeführt. Die Aufbereitung erfolgt durch mehrere Firmen, die in einigen Fällen auf Teilfraktionen spezialisiert sind. Die letztendliche Verwertung im Sinne einer stofflichen Verwertung der Metalle erfolgt durch die Norddeutschen Affinerie.

Ein mögliches Teilprojekt, an dem insbesondere die Umweltbehörde Interesse gezeigt hat, wäre die Optimierung von Erfassung und Aufbereitung von Kabelschrott und Elektronikschrott unter Nachhaltigkeitsaspekten (wobei auch Perspektiven für den zweiten Arbeitsmarkt durchaus eine wichtige Rolle spielen). Dabei sollen schon in der Phase der Sammlung und Aufbereitung die Anforderungen der Verwertung sowie der Nutzung des Produktes Kupfer soweit wie möglich einbezogen werden.

Den Projektmitarbeitern würde dabei vor allem die Aufgabe der Koordination und des Projektmanagements zukommen. Erste Gespräche zeigten einerseits eine deutliche Bereitschaft im Bereich des Elektronikschrottes verstärkt aktiv zu werden und andererseits auch ein z. T. sehr weitgehendes vorhandenes Know-How. Die übergreifende Kommunikation zwischen mehreren Schritten der Akteurskette findet bisher jedoch nur sehr eingeschränkt statt.

## **5.1.2 Stahl**

Im folgenden Kapitel werden zunächst wesentliche technische und materielle Eckpunkte des Stahlkreislaufs dargestellt. Anschließend werden drei Ansatzpunkte für einen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten optimierten Stahlkreislauf näher beleuchtet. Dabei handelt es sich zunächst um zwei inputorientierte Ansätze, bei denen die Rohstoffe der Stahlwerke im Zentrum der Betrachtung stehen (Störung des Stahlkreislaufs durch Begleitelemente am Beispiel des Kupfers in Automobilen sowie Verringerung des Verlusts von Rohstoffen durch optimierte Trennungs- und Rückführungsstrategien am Beispiel des Edelstahl). Als outputorientiertem Ansatz werden die Anforderungen an den Reinheitsgrad des Produktes Stahl am Beispiel von Drähten betrachtet.

### **Elementeigenschaften und Vorkommen**

Eisen hat die Ordnungszahl 26 und ein Atomgewicht von 55,85 g/mol. Es ist mit einem Anteil von 5,6% oder 56.000 ppm eines der häufigsten Elemente in der Erdkruste. Es liegt in seinen Verbindungen meist in 2- oder 3-wertiger Oxidationsstufe vor.

Eisenerze gelten allgemein ab einem Fe-Gehalt oberhalb von 60% als abbauwürdig bzw. als wirtschaftlich bedeutsam. Hierzu zählen insbesondere die Itaberiterzvorkommen, welche Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und Magnetit ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) enthalten (Münster, 1997, S. 27ff). Sie existieren auf allen Kontinenten mit Lagerstätten von bis zu 10 Mrd. t. Fe-Inhalt. Der Eisengehalt von Hämatit liegt zwischen 50 und 69%, der des Magnetits zwischen 59 und 67%. Magmatische Erze, wie Kiruna- oder Magnitorsk-Erze befinden sich in der Hauptsache im Ural. Die "reichsten" Eisenerze werden in den USA und Brasilien gefunden (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 1999, S. 89ff).

Weltweit wurden seit 1870 ca. 44 Mrd. t Eisenerz abgebaut. Fast die Hälfte hiervon entfiel auf die letzten 20 Jahre (berechnet nach Wirtschaftsvereinigung Stahl (WVS) 1998). Heutzutage wird der weltweite Vorrat an Eisenerzen auf ca. 800 Mrd. t geschätzt der darin enthaltene Eisenanteil auf 230 Mrd. t (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 1999, S. 89ff). Geht man von einem ursprünglichen Vorrat von 850 Mrd. t aus, so sind bereits 5,2% der Erzressourcen abgebaut (berechnet nach WVS 1998). Bei einer Menge von 140 Mrd. t abbauwürdigen Eisenerzes mit einem Gesamtgehalt 78 Mrd. t Eisen und bei gleichbleibender weltweiter Eisenerzförderung von jährlich ca. 1 Mrd. t reichen die zum jetzigen Zeitpunkt als abbauwürdig eingestuftten Vorräte bis ca. 2140. Die theoretische Reichweite des Eisenerzes reicht, unter den gleichen Voraussetzungen aber unter Ausbeutung aller bisher bekannten Erzvorräte bis zum Jahr 2230.

Tab. 4: Lagerstätten der abbauwürdigen Eisenerze

Land	Eisenerz (Mrd. t)	Eisengehalt (Mrd. t)	statistischer Fe-Gehalt (%)
China	25	7,8	31
Ukraine	22	12,0	54
Russland	20	11,0	55
Australien	18	11,0	61
USA	10	6,4	64
Kasachstan	8,3	4,5	54
Brasilien	7,6	4,8	63
Andere	26,7	16,2	61

(U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 1999, S. 89ff)

### Bergbau und Roheisenproduktion

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden 1996 weltweit 1.021 Mio. t Eisenerz gefördert, davon 331 Mio. t in Asien, 307 Mio. t in Amerika, 163 Mio. t in Australien und Ozeanien sowie 145 Mio. t in der ehemaligen Sowjetunion.

Das geförderte Erz wird in Hochöfen zu Roheisen verarbeitet. Je nach Abbauregion müssen die Erze über mehr oder weniger lange Strecken transportiert werden. Die Bundesrepublik Deutschland importierte beispielsweise 1998 insgesamt 45,5 Mio. t Eisenerz, davon 22,9 Mio. t aus Brasilien, 7,1 Mio. t aus Kanada, 6,4 Mio. t aus Australien und nur 5,9 Mio. t (13%) aus Ländern der EU (StatBuA, 1999, S. 12).

Die Menge produzierten Roheisens lag 1997 weltweit bei 575 Mio. t. Asien lag mit einer Produktion von 259 Mio. t an der Spitze, gefolgt von Europa (127 Mio. t) und Amerika (106 Mio. t). 1998 wurden 44,4 Mio. t Eisenerz mit einem durchschnittlichen Eisengehalt von 62% nach Deutschland importiert. Die Roheisenproduktion betrug im gleichen Jahr 30,1 Mio. t (StatBuA, 1999, S. 14). Die Einsatzstoffe der Produktion sind für Deutschland in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 5: Erzeugung von Roheisen und Sinter in Deutschland 1998

Einsatzstoff	Roheisen (Mio. t)	Sinter
Gesamtproduktion	30,1	28,9
Eisenerze	18,7	25,8
Inländische Sinter	28,6	
Schrott, Schlacken etc.	0,6	1,9 (kein Schrott)
Zuschläge	0,7	4,6
Gichtstaub	-	0,3

(StatBuA, 1999, S. 14)

Unter Sinter versteht man stückig gemachte Feinanteile eines Erzes, deren schwer reduzierbare Eisenträger leichter reduzierbar gemacht wurden. Dieser für den Hochofen vorbereitende Prozess besteht aus dem "Verklumpen" der Feinerzanteile mit Zuschlägen, Feinkalkstein, Koksgruß und Wasser bei Temperaturen von 1.300°C unter permanenter Luftzufuhr. Das Stückigmachen ist notwendig, um die Durchlüftung des Erzes im Hochofen zu gewährleisten (UBA, 1996, S.44 ff).

### Rohstahlproduktion

1998 wurden weltweit 777,3 Mio. t Rohstahl produziert. Deutschland stellte hiervon 44,0 Mio. t her, was etwa 5,7% der Weltproduktion entspricht. Die folgende Tabelle zeigt die Produktionsmengen der Kontinente und Europas in 1998 (StatBuA, 1999, S. 62ff).

Tab. 6: Rohstahlproduktion 1998

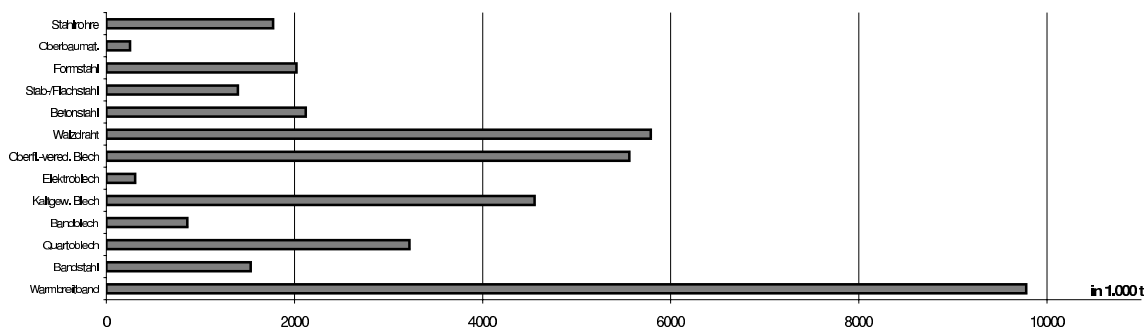
Kontinent	Produktion (Mio. t)	EU	Produktion (Mio. t)
Welt	777,3	Deutschland	44,0
Asien	308,2	Italien	25,8
Amerika	165,9	Frankreich	20,2
EU (15)	159,7	Vereinigtes Königreich	17,0
Afrika	12,0	Spanien	14,8
Australien/Ozeanien	9,6	Belgien	11,4
Osteuropa (Differenz)	121,9	Andere	26,5

Stahl wird in der Regel in direkter Nähe zu den Hochöfen hergestellt. Somit sind die Regionen mit hoher Roheisenerzeugung gleichzeitig auch die Hauptstahlproduzenten.

### Verfahren

Die Stahlherstellung via Sauerstoffkonverter ist fast der einzige Verbraucher von Roheisen in Deutschland. Nur etwa 1,7% werden im Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen, andere Verbrauchsbereiche machen zusammen weitere 2% aus. Da in Deutschland überwiegend Produkte, wie z.B. Bleche hergestellt werden, die hohe Anforderungen an die Reinheit des Stahls stellen, ist der Anteil von Oxygenstahl an der gesamten Stahlproduktion in der Bundesrepublik Deutschland mit rund 73%, verglichen mit anderen Ländern verhältnismäßig hoch (StatBuA, 1999, S. 66ff). Die folgende Grafik zeigt die Produkte der deutschen Stahlindustrie aus dem Jahr 1997.

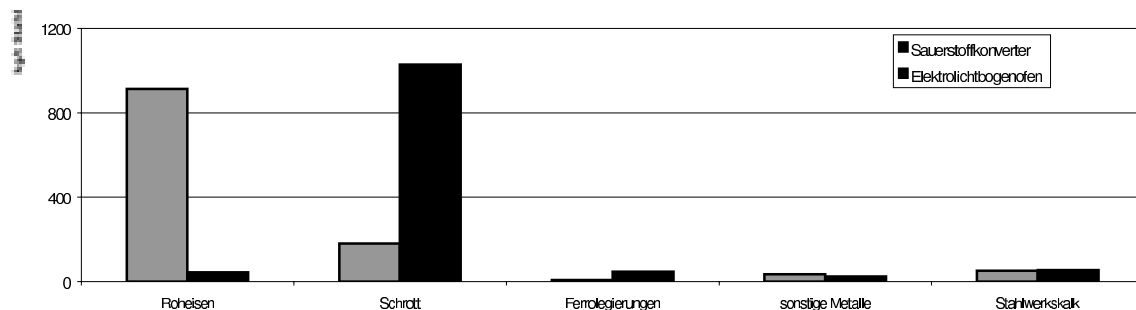
Abb. 15: Produkte der deutschen Stahlindustrie



(Wirtschaftsvereinigung Stahl, 1998, S. 29)

Die durchschnittlichen Mengen an Rohstoffen für die Rohstahlerzeugung in der BRD in 1998 sind in der folgenden Grafik für beide Verfahren dargestellt.

Abb. 16: Rohstoffeinsatz für die Rohstahlerzeugung



(StatBuA, 1999, S. 22)

In Westeuropa werden ca. 42% des Stahls im Elektrolichtbogenofen hergestellt. Die Aufteilung der Stahlerzeugung auf die beiden Hauptverfahren in den Ländern der EU ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 7: Stahlerstellung nach Verfahren und Schrottquoten in ausgewählten Ländern der EU 1998

Land	Oxygenstahl (%)	Elektrostahl (%)	Schrottquote
Frankreich	60,0	40,0	0,5
Belgien	78,5	21,5	0,3
Luxemburg	0	100	1,0
Niederlande	97,5	2,5	0,2
Italien	42,8	57,2	0,7
Großbritannien	76,5	23,5	0,4
Spanien	29,5	70,5	0,8
Deutschland	72,7	27,5	0,4

(StatBuA, 1999, S. 62ff)

### Schrotteinsatz

Für die Produktion von 44,0 Mio. t Stahl in der Bundesrepublik in 1998 wurden 18,4 Mio. t Schrott verbraucht (StatBuA, 1999, S. 22). Die Schrottquote, das Verhältnis Schrottverbrauch zu Stahlproduktion, liegt mit 0,4 deutlich unterhalb des westeuropäischen Durchschnitts von 0,59. Der hohe Anteil von Oxygenstahl in der bundesdeutschen Stahlproduktion spiegelt sich hier wieder.

Das deutsche Schrottaufkommen setzt sich aus Eigenentfall aus Stahlwerken und Gießereien, auch Kreislaufschrött genannt, Neuschrott, der bei der Stahlverarbeitung anfällt, und Altschrott, der aus nicht mehr verwendungsfähigen Verbrauchs- und Industriegütern besteht, zusammen, sowie aus importiertem Schrott. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes betrug 1998 die Menge des gehandelten Stahlschrotts in Deutschland 28,5 Mio. t. 25% dieses Schrottes stammte aus Eigenentfall von Hochöfen, Stahlwerken und Gießereien, und 56% wurden vom Handel zugekauft. Der restliche Anteil stammt aus anderen Quellen. Deutschland importierte in demselben Jahr 1,6 Mio. t Stahlschrott, hauptsächlich aus den Benelux-Ländern und exportierte 5,3 Mio. t Schrott, hauptsächlich in die Benelux-Länder, Italien und Frankreich (StatBuA, 1999, S.44ff).

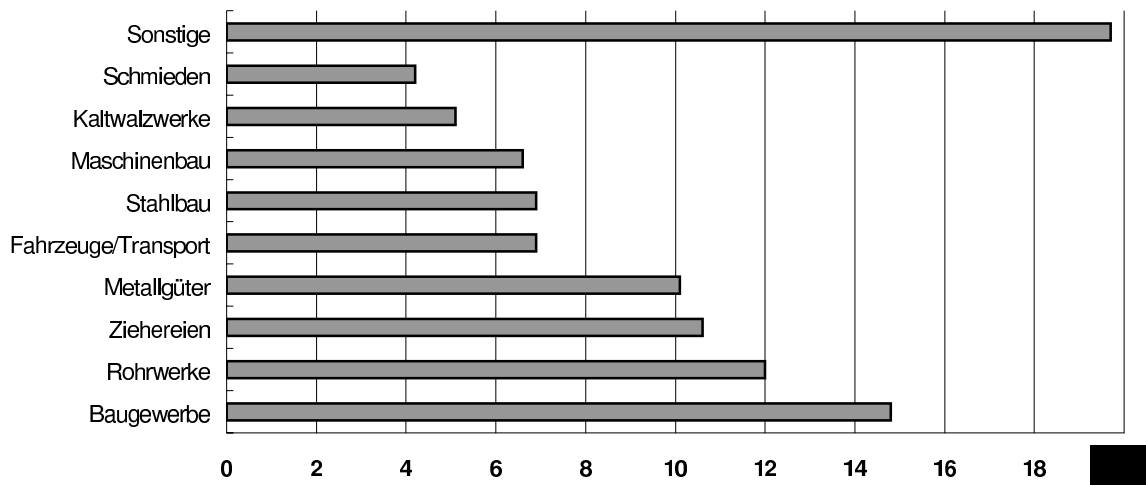
Die Nutzungsdauer von Stahlprodukten liegt zwischen wenigen Wochen (Getränkedosen) und 100 Jahren (Baustahl, Brücken und Gebäude). Etwa 45% des Stahls kommt nach 15 Jahren (BDSV - Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V., 1998, S. 3 – 4), bzw. 70% nach 20 Jahren wieder in den Kreislauf zurück. Man geht davon aus, dass 30% durch Rosten und über andere Wege für den Kreislauf verloren gehen (Willeke, R., 1994, S. 83). Andere berechnen, dass 2,7% des kumulierten Stahlbestandes jährlich als Altschrott in den Stahlkreislauf zurückkehren (Noro K., 1997).

Das International Iron and Steel Institute (IISI) schätzt die weltweite Nachfrage nach Stahlschrott im Jahr 2000 auf 423 Mio. t, wovon 239,5 Mio. t aus Eigenentfall und Neuschrott gedeckt werden und 183,5 Mio. t aus Altschrott aufgebracht werden müssten (Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V., 1998, S. 3-5).

### Verbrauchsbereiche von Stahl

Stahl findet in den verschiedensten Branchen Verwendung. Die folgende Grafik zeigt die Verbrauchsbereiche in Europa in 1994.

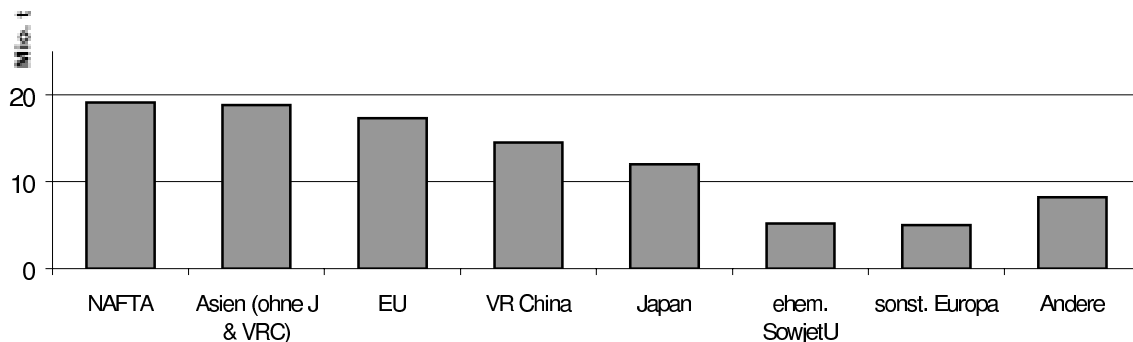
Abb. 17: Verbrauchsbereiche von Stahl in der Europäischen Union



(Eurostat, 1997, S. 85ff)

Haupterzeugnisse in der Europäischen Union waren 1994 Stabstahl (20,2 Mio. t), Bleche mit einer Stärke < 3 mm (19,6 Mio. t), Bleche 3 mm (19,1 Mio. t), sowie überzogene Bleche (16,7 Mio. t) und Walzdraht (15,0 Mio. t). Der Verbrauch von Blechen < 3 mm ist seit 1974 in den Hauptverbrauchsbereichen Kaltwalzwerke, Rohrwerke, Elektrotechnik, Fahrzeugbau und EBM-Industrie um durchschnittlich 17,6% gestiegen. Auch der Verbrauch überzogener Bleche erhöhte sich, insbesondere im Fahrzeugbau wurde die Verbrauchsmenge in den letzten 20 Jahren auf ein 25ig-faches gesteigert (Eurostat, 1997). Die wichtigsten Rohstahlverbrauchsländer sind in der folgenden Abbildung zu sehen.

Abb. 18: Stahlverbrauch Welt



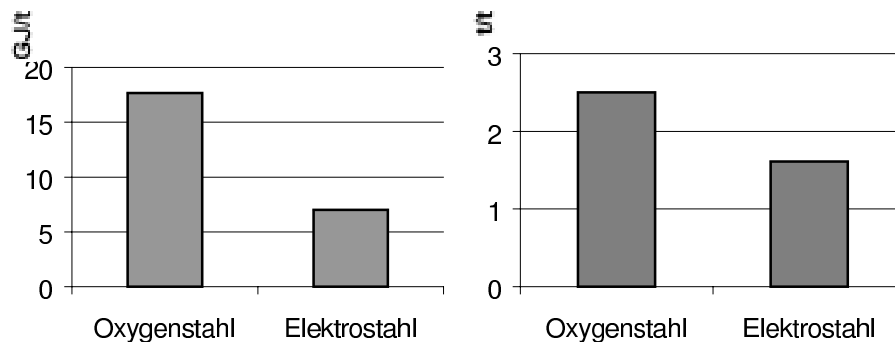
(IISI, 1997, S. 9)

## Ordnungsniveaus von Eisen in der Stahlkette

Eisen wird im Verlauf der Verarbeitung zunächst aufkonzentriert. Im Stahl liegt es mit fast 100% fast rein vor. In den Produkten und schließlich im Stahlschrott ist das Ordnungsniveau des Eisens schließlich wieder geringer, womit ein Wertverlust einhergeht.

Die einzelnen Schritte der Kette erfordern Energieeinsätze und Materialbewegungen. Die Angaben über den kumulierten Energieaufwand für eine t Rohstahl liegen für den Weg Hochofen/ Sauerstoffkonverter zwischen 12 und 23,3 GJ. Für den Materialfluss werden 1,4 bis 3,6 t pro t Rohstahl angegeben. Die Stahlerzeugung via Elektrolichtbogenofen ist mit einem KEA zwischen 5,3 und 8,7 GJ/t und einem Materialfluss von 1,4 bis 1,82 t/t deutlich weniger umweltbelastend (Wuppertal Institut, 1993, Wirtschaftsvereinigung Stahl, 1998; Bleck, 1997; Merten, 1995; FfE, 1999). Für die Weiterverarbeitung zu den Produkten der Stahlindustrie wird zusätzlich Energie und Material aufgewendet.

Abb. 19: KEA und Materialverbrauch Oxygenstahl und Elektrostahl



(Ökopol aus Quellen s.o.)

### 5.1.2.1 Edelstahl

Generell werden durch Zugabe von Stahlveredlern, wie Chrom und Nickel legierte rostfreie Sonderstähle als Edelstähle bezeichnet, innerhalb derer die so genannten stainless steels oder RSH-Stähle eine Untergruppe bilden. Leider existiert keine eindeutige internationale Definition von Edelstahl. Dadurch bedingt unterscheiden sich die Daten verschiedener Statistiken je nach Definition von Edelstahl erheblich.

RSH-Stähle (rostfrei, säurebeständig, hitzebeständig) enthalten mindestens 10,5% Chrom und 60% Eisen. Entsprechend ihres Gefügestandes unterscheidet man austenitische, ferritische, martensitische und austenitisch-ferritische oder duplex Stähle. (ASSDA, 2000)

Tab. 8: Eigenschaften der wichtigsten RSH-Stahlgruppen

Stahl	Cr (%)	Ni (%)	Häufigkeit
Austenitisch	17,0-18,4	7,0-9,0	ca. 70% der RSH- Stahl Produktion
Ferritisch	11,5-26,0	0	ca. 25 % der RSH- Stahl Produktion
Duplex	22,0-25,0	4,0-7,0	
Martensisch	12,5-17,0	20	

(ASSDA, 2000)

Edelstähle finden Verwendung bei der Herstellung von Tanks, Rohren, Pumpen, und Besteck in der Nahrungsmittelproduktion und -lagerung, der Architektur, Medizin, Atomindustrie sowie im Fahrzeugbau (ASSDA, 2000).

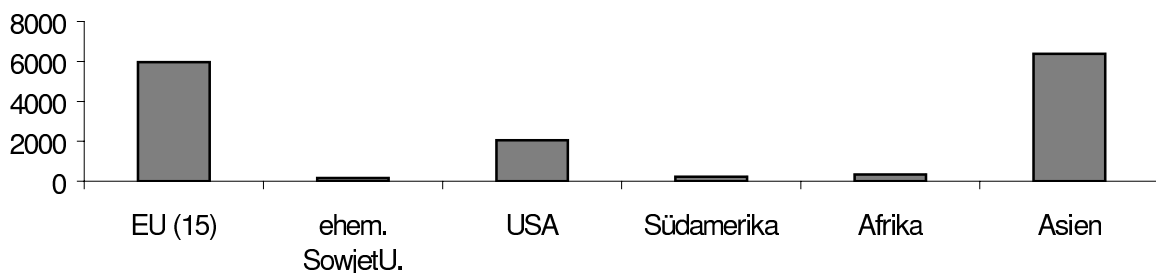
### Produktion und Verbrauch

Gemäß den Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl wurden 1997 in der EU 25,1 Mio. t, weltweit 70,5 Mio. t Edelstahl produziert. In Deutschland wurden 1998 30,5% oder 10,3 Mio. t des produzierten Rohstahls legiert (StatBuA, 1999, S. 20)

Die Produktion von RSH-Stählen lag 1997 weltweit bei 16,1 Mio. t, davon kamen 1,48 Mio. t, etwa 9% aus Deutschland (IISI, 2000). Allein für diesen Bruchteil des legierten Stahls wurden in Deutschland ca. 0,254 Mio. t Chrom und 0,08 Mio. t Nickel benötigt, die teils aus Edelstahlschrott und teils als Ferro-Verbindungen zulegiert wurden.

Für die Produktion von 1,0 Mio. t RSH-Stahl wurden 1997 in Deutschland 0,685 Mio. t RSH-Schrott eingesetzt, davon 24% Kreislaufschrötte. Die sich daraus errechnende Schrottquote in der Edelstahlproduktion hat sich seit 1990 fast verdoppelt und beträgt ungefähr 67%. Etwa 10% des Edelstahls fällt bei der Verarbeitung als Kreislaufschrötte an und wird wieder eingeschmolzen. RSH-Altschrötte enthält im Durchschnitt 8-9% Nickel und 17% Chrom. 90% der recycelten Altschrotte sind austenitisch (BDSV, 1998, 4-23).

Abb. 20: RSH-Stahl, Verbrauch Welt



(IISI, 2000)

Bis 1996 wurden 136,5 Mio. t RSH-Stahl produziert. Hiervon sind 56 Mio. t bereits in den Kreislauf rückgeführt, was eine Schrottreserve von 80,5 Mio. t Edelstahlschrott bedeutet. Nach Schätzungen des BDSV wird sie bis 2000 auf 88 Mio. t angewachsen sein und 2010 157 Mio. t betragen (BDSV, 1998, S. 4-16). Das bedeutet, dass die Edelstähle zurzeit in der Technosphäre akkumulieren und somit die Neuproduktion nicht über den Schrotteinsatz gedeckt werden kann.

#### 5.1.2.2 Chrom

##### Elementeigenschaften, Vorkommen und Abbau

Chrom ist ein hochschmelzendes Schwermetall mit der Ordnungszahl 24 und einem Atomgewicht von 52 g/mol. Es kommt in der Erdkruste mit einer Massenhäufigkeit von 150 ppm oder 0,015% vor. Chrom liegt meist als Chromit ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) in basischen bis ultrabasischen Gesteinen vor. Die größten Lagerstätten befinden sich in Südafrika (Münster, 1997, S. 35ff). Die folgende Tabelle zeigt die Chromiterzreserven, die als abbauwürdig



eingestuft werden, das heißt einen Chromitanteil von 45% (ca. 15% Cr) haben, und die Bergwerksproduktion von 1997. Bei gleichbleibenden Abbaumengen beträgt die Reichweite der heute als abbauwürdig bezeichneten Vorräte 300 Jahre, werden alle Ressourcen gefördert (geschätzte 7,6 Mio. t) sogar 600 Jahre .

Tab. 9: Abbauwürdige Chromiterzreserven und Bergwerksproduktion 1997

Land	Chromiterz (Mio. t)	Abbau 1997 (Mio. t)
Südafrika	3.000	5,78
Kasachstan	410	1,00
Indien	27	1,36
Türkei	8	1,75
Finnland	41	0,61
Simbabwe	140	0,68
Brasilien	14	0,33
Welt	3.700	12,5

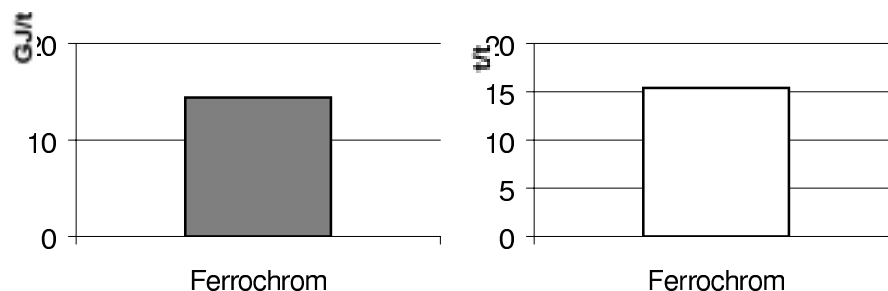
(U.S. Geological Survey, Mineral Commodities Summary, 1999, S. 48ff)

### Prozesskette Ferrochrom

Chromiterze werden in der Hauptsache im Untertagebau gefördert. Zur Aufarbeitung zu Ferrochrom stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die als vorbereitende Schritte das Mahlen, Brikettieren, Pelletieren, Sintern oder eine Vorreduktion erfordern. Beim Conventionalprozess, dem weltweit verbreitetsten Aufkonzentrierungsverfahren, kann das Chromiterz allerdings ohne Vorbehandlung im Schmelzofen eingesetzt werden. Ferrochrom kann Chromgehalte zwischen 63 und 70% haben, je nach ursprünglichen Konzentrationen im Erz.

Die Materialintensität von Ferrochrom wird vom Wuppertal Institut mit durchschnittlich 28,6 t/t Material, 22,8 t/t Wasser und 67,6 t/t Luft angegeben. Hierbei sind die Energieverbräuche in Materialverbräuche umgerechnet. Der Energieverbrauch zur Produktion von Ferrochrom liegt bei ca. 14,4 GJ/t (Wuppertal Institut, 1995, S. 14ff), der zur Produktion von Reinchrom bei ca. 77,8 GJ/t (ifu 1998).

Abb. 21: KEA und Materialverbrauch Chrom



## Verbrauch

1998 wurden 200.000 t Chromerze und -konzentrate sowie 470.000t Ferrolegierungen nach Deutschland importiert. Hauptlieferländer waren hierbei Süd-Afrika, die Türkei, Kasachstan, Simbabwe und Rußland (BGR, 1998, S. 3-2).

Die Recyclingrate von Chrom wird in Deutschland auf 15-20% geschätzt (BGR, 1998, S. 3-2). In den USA wurden 1998 21% des Chromverbrauchs aus RSH-Schrotten gewonnen (U.S. Geological Survey, Mineral Commodities Services, S. 48ff)

Etwa 79% des weltweit produzierten Chroms wird in Form von Ferrochrom in der Stahlindustrie verarbeitet. 68% werden zur Herstellung von RSH-Stahl, 8% in sonstigem legierten Stahl, 3% in Superlegierungen und 21% in anderen Verbrauchsbereichen eingesetzt (amm.com, 2000). Als Legierungselement in Stahl erhöht Chrom die Korrosionsbeständigkeit durch die Bildung einer Oxidschicht und erhöht die Druck-, Zug-, Verschleiß-, und Wärmefestigkeit (Münster, 1997, S. 35ff).

### 5.1.2.3 Nickel

#### Elementeigenschaften, Vorkommen und Abbau

Nickel ist ein hochschmelzendes Schwermetall mit der Ordnungszahl 28 und einem relativen Atomgewicht von 58,7 g/mol. Es kommt mit einer Massenhäufigkeit von 80 ppm oder 0,008% in der Erdkruste vor. Es ist sehr korrosionsbeständig und zeigt ein starkes, katalytisches Verhalten wegen seiner hohen Aufnahmefähigkeit von Wasserstoff. Es legiert leicht mit Eisen, Kupfer und Kobalt.

Nickel kommt als Pentlandit  $(\text{FeNi})_9\text{S}_8$  vornehmlich in magmatischen (sulfidischen) Erzen und als Garnierit  $(\text{NiMg})_6(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$  in lateritischen (oxidischen) Verwitterungserzen vor. Der Nickelgehalt dieser Erze liegt zwischen 0,5 und 3%. Andere Erze enthalten noch geringere Nickelanteile. Die sedimentären Manganknollen der Tiefsee bestehen zu 1-2% aus Nickel (Münster, 1997, S. 50ff).

Die wirtschaftlich abbaubaren Nickelvorräte wurden 1995 auf 40 Mio. t (Ni-Inhalt) weltweit geschätzt. Die landbasierten Nickelressourcen mit einem Ni-Gehalt von durchschnittlich 1% werden auf mindestens 130 Mio. t Ni geschätzt. Davon sind rund 60% in lateritischen und 40% in sulfidischen Lagerstätten zu finden (U.S. Geological Survey, Mineral Commodities Summaries, 1999, S. 119).

Tab. 10: Vorkommen und Bergwerksproduktion von Nickel (1997)

Land	Vorkommen (Mio. t Ni)	Abbau (Mio. t Ni-Inhalt)
Australien	3,7	0,124
Kanada	5,3	0,191
China	3,7	0,044
Kuba	5,5	0,059
Dominik. Republik	1,0	0,052
Indonesien	3,2	0,072
Neukaledonien	4,5	0,137

Rußland	6,6	0,260
Südafrika	2,5	0,035
Welt	40,0	1,120

(U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 1999, S. 119)

Bleibt der Abbau von Nickel auf dem heutigen Niveau, so reichen die abbaubaren Vorräte noch für ca. 40 Jahre, werden auch Vorkommen mit geringeren Nickelgehalten ausgebeutet (geschätzte Ressourcen 140 Mio. t Ni-Inhalt) noch für 125 Jahre.

Deutschland importierte 1998 77.000 t metallisches Nickel und 56.000 t Ferronickel. Darüber hinaus wurden Nickelmatte, Nickeloxid-Sinter und nickelhaltige Schrotte importiert. Hauptlieferländer waren Rußland, Australien, Norwegen, Indonesien, Griechenland und Brasilien (BGR, 1999, S. 3-3).

### Prozesskette Ferronickel

Lateritische Erze werden nach Vorreduktion pyrometallurgisch verhüttet und im Elektrolichtbogenofen geschmolzen zu Primär-Ferronickel. Dies wird zu Ferronickel raffiniert. Kathodennickel wird dann in mehreren Verfahrensschritten aus Ferronickel hergestellt.

Sulfiderze werden flотиert und per Magnetscheidung aufkonzentriert. Daran können sich Röst-, Schmelz- und Blasprozesse anschließen, deren Ergebnis Nickelfeinstein (77% Ni + Cu) ist. Reines Nickel wird durch Reduktion mit Wasserstoff in Hochdruckautoklaven gewonnen.

Auch die Gewinnung von Sekundärnickel im Elektroofen ist möglich. Haupteinsatzstoffe sind mit ca. 85% Edelstahlschrotte und andere legierte Stahlschrotte, ca 9% Nickel-Kupfer-Schrotte sowie etwa 6% Reinnickel (Insg, 2000)<sup>32</sup>.

### Verbrauch

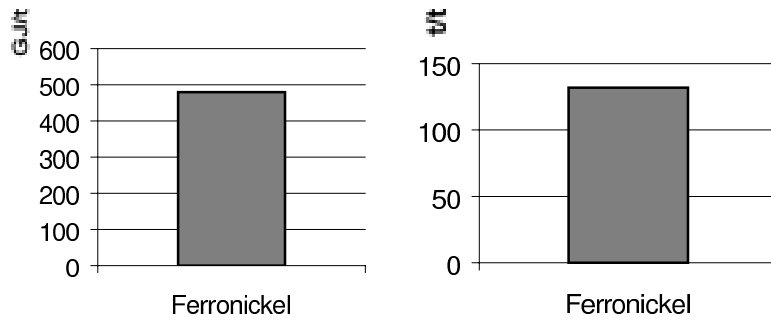
1998 wurden weltweit 1,005 Mio. t Nickel verbraucht, etwa zwei Drittel davon entfielen auf die Produktion von RSH-Stahl, ca. 12% auf andere legierte Stähle und nur 23% auf andere Bereiche, wie Vernickelungen und Nicht-Eisen-Legierungen (Insg, 2000). Als Legierungselement im Stahl erhöht Nickel die Kerbzähigkeit, Festigkeit und Hitzebeständigkeit. In Verbindung mit andern Legierungselementen fördert es zudem die Säurefestigkeit (Münster, 1997, S. 50ff).

Man geht davon aus, daß weltweit jährlich 4,4 - 4,6 Mio. t nickelhaltiger Schrott gesammelt und recycelt werden. Der darin enthaltene Nickelgehalt wird auf ca. 350.000 t geschätzt, ein Viertel der jährlichen Nachfrage. Die Nickelschrottindustrie besteht aus nur wenigen internationalen Firmen (Insg, 2000).

Die Materialintensität (der Energieverbrauch wird dabei in Materialverbrauch umgerechnet) von Ferronickel, welches hauptsächlich zur Legierung von RSH-Stahl verwendet wird, wird vom Wuppertal Institut mit 137 t/t Material, 142,1 t/t Wasser und 117,6 t/t Luft angegeben, der reine Materialverbrauch ohne Energie beträgt 132 t/t Ferronickel. Der kumulierte Energieaufwand für Ferronickel beträgt ca. 480 GJ/t Ferronickel (Wuppertal Institut, 1995, S. 29ff).

<sup>32</sup> Insg: International Nickel study group

Abb. 22: Kumulierter Energieaufwand und Materialintensität Ferronickel



### 5.1.3 Problemstellung und Ansätze für einen nachhaltigen Stahlkreislauf

Der ökologische Rucksack von Stahl, wie er derzeit in der Bundesrepublik in Produkten genutzt wird, wird sowohl energie-, als auch materialbezogen vor allem durch den Primäranteil bestimmt. Ein weniger eindeutiges Bild kann sich unter toxikologischen Aspekten aufgrund der Emissionen aus dem Recycling von Stahlschrotten ergeben (z.B. Schwermetall-, Dioxin- und Furanemissionen). Umfangreiche Forschungen und Verbesserungen im Bereich der Emissionsminderungstechnik sowie der Vorbehandlung von Stahlschrott führten jedoch dazu, die Emissionslast aus dem Sekundärpfad in Anlagen nach Stand der Technik deutlich zu verringern. Das Emissionspotential aus Sinteranlagen für die Bundesrepublik ist daher auch für die organischen Schadstoffe als größer einzuschätzen.

Materialbezogen weist Stahl - im Unterschied z.B. zu Kunststoffen - eine unbeschränkte Recyclingfähigkeit auf. Die Nutzbarkeit von Sekundärstahl wird jedoch durch Anforderungen der Produkte an die Reinheit des Stahls eingeschränkt. So werden für die Produktion von Blechen - und als Extremfall bei Tiefziehblechen - hohe Anforderungen an die Reinheit der Rohstoffe gestellt. Gerade in der BRD ergibt sich so eine starke Bindung an primäre Rohstoffe. Diese werden in integrierten Stahlwerken produziert, die ihre Inputmaterialien aus weit entfernten Quellen benötigen. Inländisch oder sogar regional vorhandene Rohstoffe (Schrott) können nur zu einem sehr geringen Teil, und auch dann wiederum nur die sehr hochwertigen Sorten, verwendet werden. Zudem sind integrierte Stahlwerke aufgrund des notwendigen Durchsatzes und des kontinuierlichen Hochofenbetriebs im Vergleich zum modernen mini-mill-Konzept von Elektrostahlwerken wenig flexibel. In diesen Faktoren werden wesentliche Gründe gesehen, aus denen Probleme bezüglich der Zukunftsfähigkeit der Stahlindustrie in ihrer heutigen Struktur resultieren.

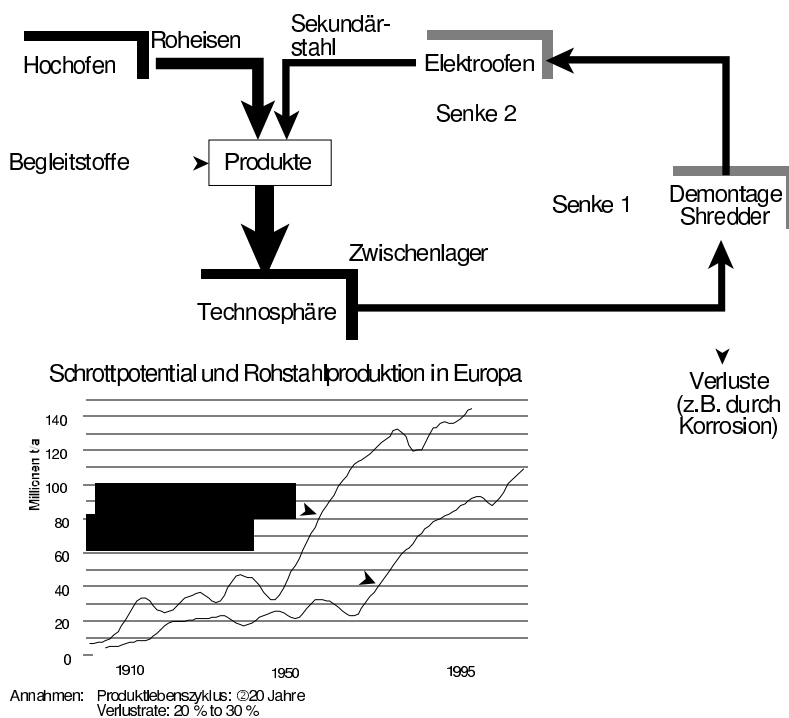
Das Wissen über die Bedeutung von Verunreinigungen für den Stahlkreislauf der Zukunft ist noch sehr gering. Japanische Wissenschaftler versuchten daher auf der Grundlage von statistischen Auswertungen zumindest größenordnungsmäßige Aussagen zu extrapolieren (Noro, 1997). Demnach soll aufgrund der steigenden Mengen zurücklaufenden Schrottes ab dem Jahr 2000 in Japan Schrott anfallen, der aufgrund seiner Verunreinigungen mit Begleitelementen nicht mehr recycelbar ist. Im Jahr 2015 soll die Menge 150 bis 300 Millionen t betragen.

In der BRD wird sich zukünftig der Druck zur Lösung des Problems der Begleitelemente verstärken:

- Der Anteil von Primärstahl, der genutzt werden kann, um den Sekundärstahl zu verdünnen, sinkt.

- Die Mengen zurücklaufenden Schrottes steigen.
- Der Anteil an Eigenschrott und bezüglich seiner Zusammensetzung gut bekannten Neuschrotts sinkt.
- Kurzlebige Güter, die schnell als Schrott in den Kreislauf zurück gelangen, bestehen überproportional häufig aus Vormaterialien mit hohen Reinheitsanforderungen und sind somit tendenziell begleitstoffärmer. Der Rücklauf aus langlebigeren Produkten, die einen wesentlichen Anteil an der kommenden Steigerung der Schrottmenge haben, bringt tendenziell zunehmend höhere Begleitstoffmengen.
- Begleitstoffe, für die bisher keine Senken im Stahlkreislauf vorhanden sind, akkumulieren im Laufe der Zeit durch das Recycling.
- Die Verringerung der Begleitstoffgehalte ist der Schlüssel zum Zugang zu Märkten für Produkte mit größerer Wertschöpfung für die Elektrostaahlwerke und damit auch für die ökonomische Zukunft eines Teils dieser Branche.

Abb. 23: Senken im Stahlkreislauf



Neben dem Einfluß auf den Stahlkreislauf kommt den Begleitelementen auch teilweise eine ökonomische Bedeutung zu. Geht man z.B. davon aus, dass Sekundärstahl durchschnittlich 0,1 % Kupfer enthält (Savov, 1998, S. 374), so ergibt sich allein für die Sekundärstahlmenge der BRD ein Verlust von Kupfer im Wert von ca. 40 Mio. DM über den jährlichen Schrottverbrauch.

## 5.1.4 Regionale Akteure in der Stoffkette

### Stahlproduzenten: Die Hamburger Stahlwerke

Die ISPAT Hamburger Stahlwerke sind der viertgrößte europäische Hersteller von Walzdraht unterschiedlicher Güte.

Die Produktion erfolgt in einer 0,5 Mio. t/a DRI Midrex Direktreduktionsanlage, einem 130 t Elektroofen und 6 kontinuierlichen Gießanlagen. Rohstoffe sind unter anderem Eisenschwamm und Schrott (Verhältnis 60:40 bis 50:50).

Die Firmenstrategie wird durch das Bestreben bestimmt, den Kunden möglichst hochwertige Qualitäten anzubieten und die Kundenbindung durch technischen Support für den Endanwender zu erhöhen (HSW, 1999).

Im Stahlkreislauf kommt den HSW die Doppelrolle zu, dass sie zum einen Hersteller von Vorprodukten sind, zum anderen auch Schnittstelle für die Rückführung von Produkten am Ende ihrer Nutzungsphase in den Wirtschaftskreislauf. Sie tragen somit auch eine doppelte Qualitätsverantwortung zum einen bei der Herstellung von Produkten nach den Anforderungen der Weiterverarbeiter und zum anderen bei der Trennung des Eisens von den im Wirtschaftskreislauf hinzugefügten 'Verunreinigungen' im Schrott.

Die Einstellung der Gehalte an Begleitstoffen im Stahl-Output erfolgt bei den HSW neben der gezielten Legierungszugabe auch durch die Mischung von Schrott und Primärmaterial.

Bezogen auf die regionale Situation zeigt sich für die HSW ebenfalls eine exponierte Stellung als einziger Schrottverwerter (im Sinne der Nutzung der stofflichen Eigenschaften des Schrotts) und Primärproduzent. Durch privatwirtschaftliche Vereinbarungen zwischen HSW und Schrotthändlern sind Vorgaben an Schrottabnahmemengen und -qualitäten gegeben. Vor allem begleitstoffarme Produkte (z.B. tire-cord) werden außerhalb der Region Hamburg weiterverarbeitet, während begleitstoffreiche Produkte (z. B. Baustahl) zu großen Teilen in der Region Hamburg verbleiben.

In der Region Hamburg sind derzeit weit über 60 Schrotthändler und –bearbeiter tätig. Die Bearbeitungstiefe reicht hierbei vom reinen Makeln bis zur abnehmerbezogenen Aufbereitung.

## 5.1.5 Inputorientierte Ansätze der Entfrachtung des Stahlkreislaufs von Störelementen am Beispiel des Kupfers in Autos

Kupfer stellt ein besonderes Problem im Stahlkreislauf dar, da es die Produkteigenschaften in den meisten Fällen schon durch geringe Gehalte negativ beeinflusst (z.B. Verformbarkeit) und im Elektroofenprozeß nicht vom Stahl getrennt wird. Als Ausschleusungspfad kommen somit lediglich die Demontage und der Shredderprozess in Frage. Bei der manuellen Demontage entsteht jedoch ein erheblicher zeitlicher Aufwand, dem keine entsprechenden Erlöse gegenüber stehen. Eine weitergehende Entfrachtung von Shreddervormaterial ist zwar z.B. durch doppeltes Shreddern möglich. Die entstehenden Kosten lassen sich zur Zeit am Markt jedoch nicht decken.

Ein wesentlicher Input für Kupfer in den Stahlkreislauf sind Autos, Maschinen und Elektrogeräte. Im Folgenden sollen daher Fahrzeuge beispielhaft detaillierter betrachtet werden.

### 5.1.5.1 Produktion

Die Herstellung von Fahrzeugen bzw. ihrer Komponenten ist nur zu sehr geringen Teilen regional orientiert. Nochmals verstärkt durch die derzeitige Konzentrationswelle bei den Konzernen werden die klassischen Automobilhersteller zunehmend zu „Assemblern“, die vorgefertigte Komponenten ihrer weltweiten Zuliefererbetriebe zum Endprodukt zusammensetzen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Vorgaben für die zugekauften Komponenten von den Herstellern gemacht werden und diese somit weitgehenden Einfluss auf deren Gestaltung haben.

### 5.1.5.2 Das Produkt und seine Nutzung

Grob überschlägig kann man von einer Kupfermenge von 25 kg pro Fahrzeug ausgehen (Stock 2000, S. 51). Die folgende Tabelle zeigt einige exemplarische Anwendungsfelder von Kupfer in Fahrzeugen.

Tab. 11: Anwendungsfelder von Kupfer in Fahrzeugen

Elektromotoren	Achsschenkelbuchsen
Pumpen	Gleitlager in Lenkgetrieben
Verriegelungen	Gleitleisten
elektrische Kontakte	Lagerbuchsen
Generator, Lichtmaschine	Synchronringe
Halbleitermontagerahmen	Ventilführungsbuchsen
Kabelbaum	Bremsbeläge
Kontaktfedern	Brennstoff- / Öl- / Bremsleitungen
Steckverbindungen	Drehteile wie z.B. Vergaserdüsen, Zylinderschlösser
Lüfter, Gebläse	Kugellagerkäfige
Startermotor	Ladeluftkühler
Steuergeräte, Relais	Schaltgabeln
Zündspule	Wärmetauscher
Zentralelektrik	Öl-/Wasserkühler

Besonders im Bereich der Elektromotoren war in den vergangenen Jahren ein deutlicher Zuwachs der Anwendungen zu erkennen. So kann ein heutiges Fahrzeug der Oberklasse 56 Motoren aufweisen (siehe folgende Tabelle).

Tab. 12: Verschiedene Elektromotoren im Fahrzeug

Scheibenwischermotor	Fensterhebermotor
Schiebedachmotor	Fondbitzverstellmotor
Motor für Umwälzpumpe / Standheizung	Antennenantriebsmotor
Stellantriebe für Heizung, Klimaregelung, Leuchtweitenregelung, Waschwasserpumpe	Türschließmotor
Heckklappenschließmotor	Zentralverriegelungsmotor
Heckwischer	Spiegelverstellantrieb
Motor für Benzinpumpe	Klappscheinwerfermotor
Gurtbringermotor oder passives Gurtsystem	Scheinwerferreinigungsmotor
Sitzverstellmotor	Lenkradverstellmotor
Kopfstützenverstellmotor	Niveauregulierungsmotor
Lehnenverstellmotor	ABS-Motor
	Motorkühlgebläse

In Hamburg waren im Jahr 1999 ca. 700.000 Autos der Klasse M1 und N1 zugelassen (KBA, 2000).

### **5.1.5.3 Entsorgung**

Die Anzahl der jährlich in Hamburg endgültig abgemeldeten Fahrzeuge beläuft sich auf durchschnittlich 60.000 (KBA, 1999, S. 316). Davon wird jedoch nur ein relativ geringer Anteil tatsächlich zur Entsorgung gelangen. Ein weitaus größerer Teil wird in das Ausland verkauft.

In Hamburg bestehen derzeit ca. 20 zertifizierte Demontagebetriebe für Altfahrzeuge. Aus den beschriebenen ökonomischen Gründen wird nur in den wenigsten Fällen das in den Autos enthaltene Kupfer dort entnommen.

Die demontierten Karosserieteile werden zertifizierten Shredderbetrieben zugeführt. In der Region Hamburg / Schleswig-Holstein arbeiten derzeit vier Shredder.

### **5.1.5.4 Perspektive**

Der Kupfereintrag am Beispiel des Autos in den Stahlkreislauf bietet gute Möglichkeiten zur Darstellung des Themas Begleitelemente als Risiko für den Stahlkreislauf. Während die Produktionssituation nur geringen regionalen Bezug aufweist, besteht in der Region Hamburg eine umfangreiche entsorgungsseitige Infrastruktur mit direktem räumlichen Bezug zu einem Stahlwerk als Abnehmer.

Im Mittelpunkt des weiteren Projektverlaufs steht die Zusammenschau von ökonomischen und ökologischen Aufwand – Nutzen – Verhältnissen z.B. bei der Frage der Kupferentfrachtung auf den verschiedenen Recyclingstufen (Demontage, Shredder, Elektrostahlwerk) und den Möglichkeiten der Automobilhersteller bei der Stabilisierung des Stahlkreislaufs unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten.

Zudem bietet dieser Bereich die Möglichkeit von Synergieeffekten mit dem Teilprojekt Anlagen- und Komponentenrecycling.



### **5.1.6 Inputorientierte Strategie zur optimierten Nutzung von Rohstoffen am Beispiel der Legierungsmetalle im Edelstahl**

Der ökologische Rucksack veredelter Stähle wird überproportional durch ihren Anteil an Veredelungselementen bestimmt. Von dem gesamten kumulierten Energieaufwand (KEA) einer Tonne eines austenitischen Edelstahls, der 8% Nickel enthält, entstehen über 60% durch das Nickel und nur ca. 40% durch die 95% Fe.

Die Rückführung von Edelstählen aus homogenen Quellen bzw. von großstückigen Edelstählen erfolgt bereits schon aus Kostengründen in großem Umfang. Ein anderes Bild ergibt sich jedoch bei kleineren Teilen bzw. inhomogenen Quellen. Hier wäre der Aufwand zur Separation bzw. Getrennthaltung für den einzelnen Akteur der Entsorgungskette oftmals höher als der potentielle Erlös.

Neben den Edelstählen wird Nickel in einer Vielzahl von Anwendungen auf oder im Stahl genutzt. So wird es z.B. in Konzentrationen von bis zu 15% als Bestandteil einer ZnNi – Beschichtung eingesetzt.

Werden solche Legierungselemente als Teile von Mischschrotten dem Stahlprozess zugeführt, gehen sie nicht nur für eine gezielte Nutzung verloren, sondern können die gewollten Produkteigenschaften auch negativ beeinflussen.

Wesentlich basierend auf Aktivitäten des regionalen Schrotthandels und der regionalen Schrottaufbereiter soll daher in diesem Teilprojekt eine Optimierungsoption für die gezielte Rückführung der Legierungselemente Chrom und Nickel unter Nachhaltigkeitsaspekten herausgearbeitet werden, bei der nach Möglichkeit die gesamte Produktkette von der Halbzeugherstellung über Konstruktion und Produktion über den Produktgebrauch bis zum Recycling einbezogen wird.

### **5.1.7 Outputorientierte Ansätze am Beispiel Stahldrähte**

Anforderungen an die Reinheit von Stahl werden in der Regel über die gewünschten Eigenschaften der herzustellenden Produkte definiert. Historisch und durch Vorgaben über Normen bedingt kann jedoch auch der Fall eintreten, dass der Stahl Zusammensetzungen aufweist, die höheren Aufwand bedeuten, als dies eigentlich von den Produkteigenschaften her notwendig wäre.

Gespräche mit den ISPAT Hamburger Stahlwerken (HSW) weisen darauf hin, dass ggf. im Bereich der Herstellung von Drähten, die von den Herstellern der Endprodukte geforderten Eigenschaften auch über veränderte Stahlzusammensetzungen mit einem geringeren ökonomischen und ökologischen Aufwand erreicht werden könnten.

Wesentlich wird es dabei darauf ankommen die Kommunikation von Stahlerzeugern, stahlbeziehenden Industriezweigen und Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Material- und Werkstoffentwicklung zu fördern. Seitens der HSW besteht hier unter anderem Interesse an einer Zusammenarbeit in der Form, dass produktbezogene Versuchsreihen mit verschiedenen Stahlzusammensetzungen durchgeführt werden.

Erste Ansätze zur Umsetzung dieses Ansatzes mit einem Reifenhersteller zeichnen sich derzeit ab.

## **5.2 Prozessorientierte Ansätze**

Die im Kapitel 4 skizzierte Differenzierung der Zugänge zu den praxisnahen Forschungsfeldern erlaubt keine vollständig trennscharfe Einteilung der resultierenden Teilprojekte.

Sie repräsentieren vielmehr jeweils unterschiedliche Blickwinkel auf den Untersuchungsgegenstand, die u.a. auch mit einem bestimmten Akteurszugang verknüpft sind.

Im Bereich der prozessorientierten Ansätze liegt der Blick auf den Bearbeitungsprozessen, der meist mittelständisch strukturierten metallbearbeitenden Firmen in der Region. Im Kontext mit der im Kapitel 4 skizzierten Nutzenorientierung bei der Kooperation mit diesen Betrieben werden auch Optimierungen in den Entsorgungsprozessen dieser Betriebe mitbehandelt.

Prinzipiell wären sowohl das Strahlmittel- als auch das Schleifmittelrecycling selbstverständlich auch als Beispiele für Kreislaufdefizite in den Stahlstoffströmen zu betrachten, allerdings von untergeordneter Mengenbedeutung.

## 5.2.1 Schleifschlammrecycling

### 5.2.1.1 Ausgangslage

Schleifschlämme aus der Bearbeitung von Stählen lassen sich sowohl aufgrund ihres üblicherweise hohen Gehaltes an KSS-Ölen/Emulsionen als auch aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihrer Kornstruktur nur schwer in den (Sekundär-) Stahlprozess zurückführen. Dies liegt in den folgenden Wirkungen begründet:

- Aufgrund des Boden- und Gewässerschutzes müssen bei Lagerung und Transport von KSS-behafteten Schleifschlämmen besondere Vorrichtungen zur Vermeidung von Tropf- und Leckverlusten eingesetzt werden.
- Die Kohlenwasserstoffverbindungen der KSS-Anhaftungen führen in den thermischen Prozessen des Schrotteinsatzes zu teilweise problematischen Emissionen, insbesondere wenn sie gemeinsam mit Halogenanteilen z.B. aus der KSS-Additivierung, aus Lackresten oder von sonstigen Verunreinigungen vorliegen.
- Neben einem Feuchteanteil von 60-80% (KSS-Öl bzw. Öl-Wasseremulsion) weisen Schleifschlämme je nach Schleifprozess einen relevanten mineralischen Anteil aus dem Abrieb der Schleifscheiben auf. Dieser muß beim Wiedereinschmelzen abgeschieden bzw. in Schlacken überführt werden.
- Auch die Metallanteile im Schleifschlamm sind überwiegend so feinkörnig, dass sie ohne spezielle Vorrichtungen beim Einsatz in Schmelzbädern aufschwimmen und verschlacken.

Aus den angeführten Gründen wurden Schleifschlämme jahrelang auf Deponien endgelagert. Sowohl im Zuge neuer schärferer Deponiegrenzwerte als auch unter dem Aspekt der Privilegierung von Verwertungs- gegenüber Beseitigungsverfahren im neuen Abfallrecht (KrW-/AbfG) wurden in den vergangenen Jahren verschiedenste Verfahrenskombinationen zur Verwertung von KSS-behafteten Schleifschlämmen entwickelt.

Sie unterscheiden sich sowohl in der Art der Vorbehandlung als auch in der Stelle der Wiedereinschleusung in den Stahlprozess. Beispielhaft seien hier einige zumindest in Pilotanlagen realisierte Vorbehandlungsverfahren aufgeführt:

- einfache Entfeuchtung durch Abtropfen auf Rüttelrosten
- KSS-Entfernungen durch Waschen und anschließende Lösemittelextraktion
- Abpressen und Kompaktieren in Brikettierpressen
- Thermische Entölung und Kompaktierung durch spezielle Sinterprozesse

Typische Wiedereinsatzstellen in den Stahlprozess sind:

- das Einblasen in den Hochofen (Rohstahlprozess)
- das Einbringen von kompaktierten Schlämmen (Briketts) in das Sekundärstahlbad (Elektrostahlwerk)
- der Einsatz in Gießereiföfen
- der Einsatz als Zuschlagstoff im Klinker-Brennprozess der Zementherstellung

Unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit sind diese Wiedereinsatzmöglichkeiten sehr unterschiedlich zu bewerten. Sie sind allerdings jeweils im engen Kontext mit den notwendigen Vorbehandlungsverfahren zu diskutieren.

Die reale Entsorgungspraxis von Schleifschlämmen wird von den Entsorgungskosten und den abfallrechtlichen Anforderungen bestimmt. Beide Steuerungssignale favorisieren derzeit eher einfache Verwertungen auf geringerem Veredelungsniveau. Das abfallrechtlich verankerte Gebot der Hochwertigkeit der Verwertung wird damit nicht umgesetzt.

Dieses „Vollzugsdefizit“ liegt u.a. in der Unsicherheit der beteiligten Akteure (Erzeuger, Entsorger und Behörden) bei der Beurteilung verschiedener Verwertungsoptionen begründet. Unter diesem Aspekt erscheint hier eine „Hochwertigkeits-“ und Nachhaltigkeitsprüfung sinnvoll, um das skizzierte Kreislaufdefizit zu verringern.

### **5.2.1.2 Vorgehen**

Anhand konkreter Schleifschlammchargen (mit definierten Legierungsanteilen und KSS Gehalten) bei beteiligten Praxispartnern werden verschiedene Verwertungsalternativen für Schleifschlämme auf ihre „Nachhaltigkeit“ geprüft. Vorliegende Arbeiten zu einer orientierenden ökobilanzierenden Bewertung verschiedener Verwertungsoptionen<sup>33</sup> sowie konkrete Erfahrungen aus Einsatzversuchen im Kupolofen<sup>34</sup> werden entsprechend ausgewertet. Ausgehend von den konkreten Rahmenbedingungen der betrachteten Entsorgungswege werden die jeweiligen ökonomischen und beschäftigungsbezogenen Effekte erhoben (qualitativ) und entsprechend abgebildet.

### **5.2.1.3 Zielsetzungen**

#### **Ökologisches Ziel**

Durch eine möglichst hochwertige Verwertung von Schleifschlämmen soll ein Beitrag zur Entlastung der Primärproduktion erfolgen, wobei gleichzeitig die Überführung der anhaftenden Schadstoffe in wirksame Senken sichergestellt werden muß.

#### **Ökonomisches Ziel**

Das ökonomische Wertpotential in den Schleifschlämmen soll nutzbar gemacht und ein Beitrag zur wirtschaftlichen Existenzsicherung ökologisch sinnvoller Verwertungsanlagen geleistet werden.

#### **Soziales Ziel**

Im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Existenzsicherung spezialisierter Verwertungsanlagen steht auch die Frage der dort angesiedelten Arbeitsplätze.

#### **Projektstand**

Im Projektrahmen bestehen umfangreiche Kontakte sowohl zu Betrieben, die Schleifschlämme erzeugen, als auch zu einschlägigen Entsorgungsanlagen-Betreibern.

---

<sup>33</sup> Jepsen, D.; Sander, K.: Umweltbezogene Bewertung des Einsatzes von Schleifschlämmen in Gießereiföfen, 1995, Auftrag: Institut für Gießereitechnik GmbH

<sup>34</sup> Jepsen, D.; Sander, K.: Vergleich unterschiedlicher Verwertungsverfahren für kühlenschmierstoffbehaftete Metall-Schleifschlämme, 1993, Auftrag: Niedersächsisches Umweltministerium

Derzeit wird über entsprechende Ausschreibungen nach studentischen Mitarbeitern für die Modellierung der verschiedenen Verwertungsoptionen als Basis für die Hochwertigkeits- und Nachhaltigkeitsprüfungen gesucht.

## **5.2.2 Strahlmittelabfälle**

### **5.2.2.1 Ausgangslage**

Strahlen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem ein Strahlmittel mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche eines Werkstückes aufgebracht wird. Die Strahlmittel für derartige Oberflächenbehandlungen bestehen meist aus mineralischem Material oder Stahl- bzw. Eisenkugeln unterschiedlicher Körnung.

Während die eigentlichen Strahlkörper nach einer entsprechenden Trennung (Siebung o.ä.) direkt wiederverwendet werden können, fällt gleichzeitig ein meist sehr feinkörniges Gemisch aus Strahlmittel und Stahlsubstrat an. Aufgrund der Feinkörnigkeit und teilweise deutlicher Schadstoffgehalte (insbesondere beim Strahlen lackierter Flächen) sind die Rückstandsgemische als besonders überwachungsbedürftige Abfälle mit entsprechendem Aufwand zu entsorgen. Meist findet eine Verbringung in den Bergversatz unter Tage statt.

Insbesondere bei Strahlmitteln auf Basis von Stahlkörpern, die in der reinen Entrostung und Entgratung eingesetzt werden, stellt sich aufgrund der hohen stofflichen Reinheit und des geringen Schadstoffpotentials die Frage, ob nicht Entsorgungswege beschritten werden können, die eine stoffliche Verwertung auf hohem Niveau sicherstellen.

Bei einem der Praxispartner fallen entsprechende Abfallgemische an, für die nach entsprechend hochwertigen Verwertungsoptionen in der Region recherchiert wird, die dann einer entsprechenden Nachhaltigkeitsprüfung unterzogen werden.

### **5.2.2.2 Praxisbeispiel**

Die Firma Jungheinrich strahlt in ihrer Strahlanlage Profileile aus Baustahl. Diese Profileile werden vor dem Strahlen geschweißt und spanend bearbeitet. Der Zweck des Strahlens besteht in der Reinigung und Oberflächenveredelung der Profileile. Bis auf wenige Ausnahmen stammen die Profileile von einem Lieferanten. Als Strahlmittel wird ein kugeliges Strahlmittel mit einem Fe-Anteil von >98 % (Massenprozent) verwendet. Daraus resultiert eine für Abfälle aus der Oberflächenbearbeitung ansonsten unübliche hohe Sortenreinheit.

1998 wurden bei Jungheinrich ca. 5.170 t/a Profileile gestrahlt, dazu wurden 18 t/a Strahlmittel eingesetzt. Bei diesem Prozeß sind 37,4 t/a Strahlmittelabfälle angefallen. Aufgrund ihrer Lungengängigkeit werden diese Abfälle derzeit unter erhöhten Sicherheitsanforderungen gesammelt und an ein Recyclingunternehmen gegeben, wo sie für den Wiedereinsatz im Rohstahlprozess (Hochofen) gesintert werden. Im Zuge dieser Verwertung sind sehr lange Transportwege notwendig (> 400 km), während der Wiedereinsatz auf einem niedrigen Veredelungsniveau erfolgt.

### **5.2.2.3 Vorgehen**

In Zusammenarbeit mit Firmen im Hamburger Großraum, welche pulvermetallurgische Produkte herstellen, wird die direkte Verwertungsmöglichkeit derartiger Abfallstoffe geprüft. Es sollen neben den stofflichen auch die Struktureigenschaften genutzt werden. Dabei spielen die Eigenschaften der Strahlmittelabfälle, wie Sortenreinheit und Korngrößenspektrum, eine entscheidende Rolle.

In einem ersten Schritt wurden die Strahlmittelabfälle auf die erforderliche Sortenreinheit und Korngrößenverteilung untersucht. Von der Fa. Jungheinrich gelieferte Strahlmittelabfälle verschiedener Fraktionen wurden auf ihre chemische Zusammensetzung mittels EDX-Analyse untersucht und die Teilchengröße metallographisch bestimmt. Die ersten vorliegenden Ergebnisse lassen erkennen, dass die benötigte Sortenreinheit offensichtlich gewährleistet werden kann. Allerdings weisen die Pulverpartikel ein relativ breites Korngrößenspektrum und stark unterschiedliche prozentuale Zusammensetzungen hinsichtlich der Strahlmittel- bzw. Abfallanteile auf. Im weiteren Projektverlauf wird es notwendig sein, die bisherigen Ergebnisse statistisch abzusichern. In einem weiteren Schritt soll dann mit Versuchen zur stofflichen Nutzung der Strahlmittelabfälle begonnen werden. Parallel wird im Großraum Hamburg nach weiteren Unternehmen gesucht, in denen Strahlmittelabfälle mit hoher Sortenreinheit anfallen.

#### **5.2.2.4 Zielsetzungen**

##### **Ökologisches Ziel**

Durch eine möglichst hochwertige und anfallstellennahe Verwertung der gebrauchten, metallischen Strahlmittel soll ein Beitrag zur Entlastung der Primärproduktion und die Transportaufwendungen verringert werden.

##### **Ökonomisches Ziel**

Es werden derzeit keine relevanten ökonomischen Effekte durch eine veränderte Verwertung der Strahlmittelabfälle vermutet. Ein großer Teil der Entsorgungskosten resultiert aus dem gesundheitlichen Gefährdungspotential der Abfallgemische und den entsprechenden Handhabungsanforderungen. Diese sind in weiten Bereichen unabhängig vom jeweiligen Verwertungsweg. Aufgrund der vergleichsweise geringen Mengenbedeutung kann auf der anderen Seite keine gravierende Entlastung bei der Rohstoffversorgung der entsprechenden Verwertungsprozesse realisiert werden.

##### **Soziales Ziel**

Entsprechend den geringen ökonomischen Effekten sind auch keine arbeitsplatzbezogenen Effekte zu erwarten. Die Gewährleistung des Gesundheitsschutzes ist als sozialer Mindeststandard unverzichtbar vollständig zu gewährleisten, stellt somit auch kein Optimierungsziel der Maßnahmen dar.

### **5.2.3 Optimierte Kühlschmierung bei der Metallbearbeitung**

#### **5.2.3.1 Ausgangslage**

In den spanenden Metallbearbeitungsprozessen (sowohl mit geometrisch bestimmter als auch mit geometrisch unbestimmter Schneide) werden heutzutage überwiegend Kühlschmierstoffe (KSS) als Hilfsstoffe eingesetzt. Mit diesem Hilfsstoffeinsatz werden verschiedene Zwecke verfolgt:

- Verringerung der Reibarbeit und damit Verringerung von Energieverbrauch und Wärmeentwicklung und damit u.a. eine deutliche Standzeitverlängerung der Werkzeugschneiden;
- Aufnahme und Abtransport der Wärme aus der direkten Schneidzone;
- Verbesserung der Spanabfuhr.

Diesen beabsichtigten positiven Wirkungen des KSS-Einsatzes stehen eine Reihe negativer Effekte entgegen:

- Gesundheitsbelastungen der Mitarbeiter durch Nebelbildungen aus lungengängigen Feinstropfen und durch Reizungen der Haut;
- Zusätzliche Hilfsstoffkosten und permanenter Pflegeaufwand zur Standzeitkontrolle und Pflege der KSS-Bäder;
- Maschinentechnischer Aufwand durch die Zusatzeinrichtungen zur KSS-Bevorratung, -Zuführung, -Rückführung und -Reinigung;
- Verunreinigung der Werkzeugmaschinen und der Maschinenumgebung durch KSS-Nebel mit entsprechendem Reinigungsaufwand;
- Zusätzlicher Entsorgungsaufwand für verworfene KSS-Bäder und Filtermaterialien;
- Erschwernis beim Wiedereinsatz der Bearbeitungsspäne und -schlämme durch die anhaftenden KSS-Rückstände.

Aufgrund der technologischen Entwicklung insbesondere bei Werkzeugwerkstoffen aber auch in Hinblick auf Schneidengeometrien und Maschinengeschwindigkeiten besteht mittlerweile die prinzipielle Möglichkeit, hochwertige Schneidoperationen auch ohne zusätzlichen KSS-Einsatz zu realisieren.

Hier kann unterschieden werden zwischen der Trockenbearbeitung, die vollständig auf den KSS-Einsatz verzichtet, und der Minimalmengenschmierung (MMS), die durch eine sehr exakte Dosierung und Zuführung nur soviel KSS an die Schneidstelle führt, wie dort benötigt wird. Die KSS verdampfen dabei praktisch vollständig. Da im Hinblick auf die vorstehend skizzierten negativen Effekte des KSS-Einsatzes beide Technologien fast gleichwertig sind, werden sie hier zunächst gemeinsam unter dem Begriff Trockenbearbeitung behandelt.

Trotz ihrer grundsätzlichen Verfügbarkeit werden diese technologischen Möglichkeiten bislang jedoch nur bei wenigen Pilotbetrieben in größerem Maßstab zur Anwendung gebracht. Die Gründe dafür sind meist (maschinen-)technischer Natur:

- Die Werkzeugmaschinen müssen hinsichtlich Schnittgeschwindigkeit und KSS-Zuführungsmöglichkeiten (bei MMS) bestimmte Mindestanforderungen erfüllen.
- Die Werkzeugkosten der Trockenbearbeitungswerkzeuge liegen teilweise signifikant über den traditionellen Werkzeugen, so dass insbesondere bei Vorhandensein umfangreicher Werkzeugsätze relevante Umrüstungskosten entstehen.<sup>35</sup>

Einige Bearbeitungsprozesse sind bislang nicht trocken durchzuführen. Beispielhaft benannt sei hier die Fertigung von Passungen an dünnwandigen Bauteilen mit hohen Anforderungen. Hier ergeben sich durch die höheren Drehzahlen und die entsprechenden thermischen Belastungen der Bauteile Fertigungsprobleme. Gerade bei flexiblen Fertigungsstationen kann deshalb vielfach keine vollständige „Trockenlegung“ erfolgen, so dass ein Großteil der positiven (Neben-)Effekte der Trockenbearbeitung nicht wirksam wird.

Verbunden mit dem vorstehend skizzierten „Flexibilitätsverlust“ und mit kolportierten Negativerfahrungen aus den ersten Praxistests der neuen Techniken existieren bei den Praktikern vielfältige nur teilweise objektivierbare Vorbehalte gegen eine Umstellung.

Da die Trockenbearbeitung unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit tatsächlich eine günstige win-win-Situation zwischen den verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen darstellen kann (siehe unten), erscheint sie als ein besonders geeignetes Beispielfeld für nachhaltige Prozessinnovationen. Vor dem geschilderten IST-Stand ergeben sich hierbei verschiedene Innovationsarten/-richtungen:

---

<sup>35</sup> Die Standzeiten der neuen Werkzeuge, sind dagegen häufig höher, so dass der negative Effekt bei der Massenfertigung wieder ausgeglichen wird.

- Innovation bzw. Diffusion der verfügbaren technologischen Lösungen in ein breiteres Anwendungsfeld, insbesondere in den spanenden Bearbeitungsprozessen der KMU. Hier ist durch den Verweis auf ähnlich gelagerte Referenzanwendungen und durch die Unterstützung bei der Einführung insbesondere subjektiven Vorbehalten entgegen zu wirken.
- Innovation durch Erweiterung des Technologiefensters in Hinblick auf die trockene Zerspanung problematischer (hochlegierter) Stähle bzw. durch den Einsatz in schwierigen Bearbeitungsprozessen, z.B. beim Schleifen.

Beide Innovationsarten/-richtungen sollen im Projektrahmen zumindest exemplarisch realisiert werden.

### **5.2.3.2 Vorgehen**

Ausgehend von den konkreten Zerspanungsanforderungen und dem verfügbaren Maschinenpark in einigen der beteiligten Partnerbetriebe werden die Möglichkeiten zur Trockenbearbeitung bei der spanenden Bearbeitung geprüft und ggf. umgesetzt. Dabei wird gezielt auf die Lösungskompetenz am Fachbereich Maschinenbau und Produktion der Fachhochschule Hamburg und bei Partnerbetrieben aus der Region zurückgegriffen.

Mittelfristiges Ziel ist der Aufbau eines regionalen Kompetenzzentrums oder Netzwerkes für den weiteren Praxistransfer dieser neuen Bearbeitungstechniken.

### **5.2.3.3 Zielsetzungen**

#### **Ökologisches Ziel**

Durch die deutliche Reduzierung bzw. die vollständige Vermeidung des Hilfsstoffeinsatzes bei der spanenden Metallbearbeitung sollen sowohl in der Vorkette dieser Hilfsstoffe als auch in den verschiedenen Austragspfaden (Raumluft, Abfälle, Abwasser) deutliche ökologische Entlastungen erreicht werden.

#### **Ökonomisches Ziel**

Wenn sich die Trockenlegung der Bearbeitungsprozesse mit begrenzten Investitionsmitteln realisieren lässt, können durch die eingesparten Hilfsstoff- und Nebenkosten deutliche Beiträge zur ökonomischen Sicherung der spanenden Bearbeitungsschritte gerade in kleinen und mittleren Betrieben realisiert werden. Darüber hinaus steigt als Nebeneffekt dieser Prozessinnovation auch die betriebliche Akzeptanz für weitere zunächst nicht unmittelbar verknüpfte Modernisierungsschritte mit einem vorab nur schwer quantifizierbarem Gesamtnutzen.

#### **Soziales Ziel**

Da Akzeptanz, Motivation und Kenntnisse unverzichtbare Bestandteile der Prozessumstellung sind, wird der Überwindung der in diesen Bereichen liegenden (sozialen) Hemmnisse eine besondere Bedeutung zugemessen.

Durch die Reduzierung der Belastungen aus der KSS-Anwendung, bzw. durch die Substitution der bisher eingesetzten KSS, erfolgt ein substantieller Beitrag zum Gesundheitsschutz und zur Arbeitsqualität in der spanenden Metallbearbeitung.

Während bei den Zerspanern kaum quantitative Beschäftigungseffekte zu erwarten sind, ist zu prüfen, wie diese Effekte in der Zulieferindustrie (KSS-Formulierer, Werkzeughersteller und Werkzeugmaschinenhersteller) verteilt sind.

#### **5.2.3.4 Projektstand**

In der ersten Projektphase wurde ausgehend von einem ganz konkreten Investitions- und Umstellungsvorhaben in einem Fräszentrum bei der Fa. Bauermeister durch die Projektgruppe der direkte Kontakt zum regionalen Anbieter entsprechender Werkzeuge hergestellt. In enger Abstimmung mit den beteiligten Firmen werden derzeit die ökonomischen und technologischen Implikationen der Trockenlegung dieses konkreten Bearbeitungszentrums geprüft und diskutiert.

Weitere komplexere Prozessumstellungen sollen gemeinsam mit der Fachhochschule Hamburg und Firmen aus der Region angegangen werden. Dabei geht es über die reine Diffusion existierender Lösungsansätze hinaus um eine Erweiterung des Technologiefensters - einerseits im Hinblick auf die spanende Bearbeitung (Drehen) von nichtrostenden Stählen in der Massenfertigung und zum anderen um die umfassende Trockenlegung flexibler Bearbeitungszentren in der Werkstattfertigung.

### **5.3 Produktorientierte Ansätze**

#### **5.3.1 Ökonomische Ausgangslage - treibende oder hemmende Grundlage**

Die Rahmenbedingungen für das produzierende Gewerbe sind von technischem Wandel, zunehmendem Wettbewerbsdruck in Folge der Globalisierung und politisch-rechtlichen Umwälzungen (KrW-/AbfG, europäischer Binnenmarkt, Öko-Steuer“-reform“) geprägt. Hinzu kommen Verschiebungen in den Märkten, z.B. von angebots- zu nachfragedominierten Käufermärkten mit einer verstärkten internationalen Konkurrenz auf Kosten- und Technologiemarkten. Betroffen sind Großserienhersteller ebenso wie Hersteller kleiner Serien und Anlagen (VDI, Berichte 1510,1999). Sie unterliegen ständigem Kostendruck, Innovationsdruck sowie dem Druck, der vom Käufer nachgefragten Variantenvielfalt nachkommen zu müssen. Dieser Druck zwingt die Unternehmen kontinuierlich Qualität, Leistung und Preis ihrer Produkte und Anlagen zu optimieren und flexibel auf die veränderten Anforderungen zu reagieren.

#### **5.3.2 Nachhaltigkeitsorientierte Produkt(ions)strategien**

Die wegen den oben skizzierten Bedingungen zur Zeit ohnehin nötigen und stattfindenden Umstrukturierungen werden im Projekt als Chance für Innovationen in Richtung Nachhaltigkeit aufgegriffen. Im Rahmen der Entwicklung von flexibleren und effektiveren Produktionsweisen und den damit einhergehenden Neuorientierungen werden Nachhaltigkeitskriterien in die „Lastenhefte“ der Produktentwicklung mit aufgenommen und in engem Kontakt mit den Unternehmen entwickelt und überprüft (Kriterienraster angewendet auf *state of the art*). Über eine beispielhafte Operationalisierung der Nachhaltigkeitsziele soll auf diese Weise ein bereichsspezifisches Leitbild für Produktstrategien entwickelt und zugleich auch die entwickelten Indikatoren/Kriterien ihrerseits überprüft werden.

Verschiedene Ansätze entlang des Produktlebenszyklus werden hierzu verfolgt. Die Weiterentwicklung und Anwendung von recyclinggerechtem Konstruieren dient als Grundlage für die Kreislauffähigkeit auf höchstmöglichem Niveau, d.h. für das Anlagen- und Komponentenrecycling. Neben der „nachhaltigen Werkstoffauswahl“ ist eine modulare Aufbaustruktur eines Produktes für die Entwicklung, Wartung, Modernisierung, Demontage und Kompatibilität mit Konkurrenzprodukten für ein hochwertiges Recycling von großer Bedeutung. Über die in engem Zusammenhang mit einer nachhaltigen



Produktausrichtung stehende Entwicklung von materiellen Produkt- zu Dienstleistungsangeboten (Leasing, Flottenmanagement) ist ein geringerer Anteil von Material und Energie an der Wertschöpfung sowie die Erschließung neuer Arbeitsfelder und positiver Beschäftigungseffekte zu erwarten. Die Motivation zur Nutzungsintensivierung und Lebenszeitverlängerung von Produkten für die Anbieter von Dienstleistungen schließt den Kreis des Produktlebens.

Innerhalb des Projektrahmens werden auf der Grundlage von Unternehmenskontakten und der Recherche laufender Projekte bzw. bereits vorhandener Quellen, entlang den Lebensabschnitten eines Produkts (Herstellung/Produktion, Betrieb/Nutzung, „Entsorgung“/ Weiterverwendung) in Kooperation mit den Partnerunternehmen entsprechende Strategien (Modulbauweise, Flottenmanagement/Leasing, Anlagen- und Komponentenrecycling) ausgewählt bzw. weiterentwickelt.

### **5.3.2.1 Modulbauweise**

Die modulare Bauweise/ Baukastensystem bewährt sich als angemessene Reaktion auf die erwähnten veränderten und neuen Anforderungen in immer mehr industriellen Anwendungen (Gierse, F.J., in VDI Berichte 1510, S. 1, 1999). Sie zeigt einen Weg auf zwischen den an sich widersprüchlichen Anforderungen des Marktes, der einerseits Vielfalt fordert und gleichzeitig zur Kostenreduktion zwingt. Sie verbindet Komplexitätsreduktion, Bereitstellung von Varianten/Typenvielfalt mit kürzeren Entwicklungs- u. Innovationszyklen und der Chance zur zumindest teilweisen Massenfertigung (Basismodule, in Verbindung mit Plattformstrategie). Die flexiblere Produktion bietet, gerade für die Anbieter komplexerer Produkte, bei gleichzeitig vielfältigen Kundenwünschen die Möglichkeit zu einer deutlichen Effizienzsteigerung (Roloff, W. in VDI Berichte 1510, S. 208, 1999).

### **Ansatzpunkte im Projekt**

Zur Zeit werden Beispiele für die Entwicklung modularer Bauweisen und die Formen ihres Einsatzes aus mehreren Unternehmen zusammengetragen. Dabei werden u.a. die Motivation, die Praxis der Einführung, Hemmnisse und noch auszuschöpfende Potentiale betrachtet. Weitere Unternehmen mit möglichen Potentialen für eine Einführung sollen im nächsten Schritt sensibilisiert und mit ihnen mögliche Hemmnisse überwunden werden.

Im Rahmen eines Workshops (Anfang Juli 2000) sollen erfahrene sowie potentielle Anwender der modularen Bauweise, unterstützt durch Experten aus der angewandten Wissenschaft und EKOS-Wissenschaftspartnern, ihre Erfahrungen, die sich eröffnenden Potentiale und ihre Erwartungen für eine Umsetzung dieser Konzepte diskutieren. Dabei soll besonderes Gewicht auf den Bereich der KMU gelegt werden, bei denen Innovationen wegen betrieblicher Alltagszwänge und einer geringen Kapitaldecke oft hinten anstehen. Den Rahmen dazu stellt das Leitbild einer noch genauer auszuförmulierenden nachhaltigkeitsorientierten Produktstrategie dar.

### **Projektpartner**

Jungheinrich AG: Das Unternehmen stellt Flurförderfahrzeuge, Lager- und Materialflusstechnik her und bietet umfangreichen Service an. Vom klassischen Maschinenbau geht die Entwicklung vermehrt hin zum dienstleistungsorientierten Unternehmen. Die Produktionsstandorte befinden sich in der Bundesrepublik, Großbritannien, Frankreich und Spanien. Die Konzernleitung ist in Hamburg. Die Jungheinrich AG beschäftigt konzernweit fast 9000 MitarbeiterInnen (Dezember 1999).

Als Ergebnis eines Ende 1999 im Unternehmen selbst abgehaltenen Workshops unter Teilnahme verschiedener Abteilungen wurden vier Themen (Simultaneous Engineering, Modulstrategie, Entsorgung von Strahlmittelabfällen, vergleichende Ökobilanz für orga-

nische bzw. wasserbasierende Lacke) als besondere Bedarfsfelder bzw. mögliche positive Beispiele für eine nachhaltige Ausrichtung festgehalten.

Die seit knapp 10 Jahren verfolgte Modulstrategie wurde, ausgehend von verschiedenen Grundtypen ähnlicher Produkte, zu einer Baureihe mit unterschiedlichen Modulkombinationen entwickelt. Als Ergebnis zeigt sich heute ein erfolgreiches Konzept, das die Teilschritte von der Entwicklung, Planung, Konstruktion, Fertigung, Vertrieb und Wartung über bisher weitgehend getrennte Bereiche hinweg harmonisiert und auf einen „Nenner“ gebracht hat. In Zusammenarbeit mit dem Unternehmen sollen Ansätze für eine nachhaltigkeitsorientierte Produktausrichtung und eine Rückkopplung auf gemeinsam erarbeitete Nachhaltigkeitsleitlinien erstellt werden. Es ist für eine gemeinsame Zieldefinition von großer Bedeutung, dass das Unternehmen sich seit Jahren proaktiv mit der Bauteilrücknahme und dem Bauteilrecycling im Sinne einer nachhaltigen Produktgestaltung beschäftigt. Die Sensibilität für solche Fragestellungen zeigt sich auch in einer Zertifizierung des Umweltmanagementsystems nach ISO 14001 des Werks in Hamburg.

### **5.3.2.2 Anlagen- und Komponentenrecycling**

Im Bereich der Automobilindustrie findet Komponentenrecycling bekannterweise schon seit Jahren im großen Maßstab statt (z.B. Lichtmaschinen, Austauschmotoren). Ebenso gibt es bei Kopierern (Rank-Xerox) und Reinigungsmaschinen Beispiele für eine weitgehend komplette Wiederaufarbeitung der Geräte (Meffert; Kirchgeorg 1998; VDMA 1999; Fleig 2000). Quantitativ gesehen handelt es sich jedoch noch um Ausnahmen. Der Großteil der Anlagen und Komponenten landet als sekundärer Rohstoff auf dem Schrott (Fleig 2000). Das hat zur Folge, dass (1) Werte unnötig vernichtet werden bzw. andere Produkte mit hohem Aufwand neu erschaffen werden müssen und (2) Stoffströme weder nach Werkstoffen (Stahl, Kupfer, Kunststoffe) noch nach Legierungsbestandteilen getrennt werden und somit einem Recyclingprozess auf niedrigem Niveau zugeführt werden müssen (siehe Kapitel 5.1.2 Stahl). Inzwischen gibt es zahlreiche Aktivitäten die sich dieser Problematik annehmen (Automobilindustrie, Elektronikindustrie, VDMA, FZKA-PFT 195; Hopfenbeck, 1995; Rubik, 1997). Auch innerhalb des Rahmenkonzeptes *Produktion 2000* des BMBF, sind zahlreiche integrierende Lösungsansätze der oben genannten Problemfelder bereits beispielhaft bearbeitet worden (BMBF, Verzeichnis der Ergebnisberichte - Produktion 2000, Forschung für die Produktion von Morgen, 2000).

### **Ansatzpunkte im Projekt**

Bei den Recherchen zu diesem Themenbereich haben wir kaum Beispiele für Produktrecycling im Maschinenbau (außer den oben beschriebenen) gefunden. Eine Lücke klafft auch bei den zahlenmäßig belegten ökologischen Vorteilen dieser Recyclingart. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass eine Nutzungsintensivierung und Lebensdauererlängerung Vorteile bringt; oder bei Fleig 2000 (S. 54) wird nur auf eine Studie des M.I.T. von 1974 hingewiesen. Ausnahmen sind hier wieder der KFZ- Bereich, Verpackungssysteme und Waschmaschinen (Fleig 2000, S. 308).

Wir sehen daher unsere Aufgabe in der systematischen Aufbereitung von Beispielen des Produkt- und Komponentenrecyclings im Maschinenbau (von denen es einige gibt), in dem Transfer der in den anderen Bereichen (KFZ, EDV, ...) gemachten Erfahrungen und Methodenentwicklungen und in der exemplarischen Analyse der ökonomischen und ökologischen Effekte bei einem Maschinenbauunternehmen in der Region Hamburg.

Zur Zeit bereiten wir einen Initiierungsworkshop vor, der im Juni 2000 stattfinden wird und den Start des oben erwähnten Transfers einläutet. Auf diesem Workshop soll jedoch nicht nur einseitig frontal Wissen vermittelt werden, vielmehr erhoffen wir uns von den Unternehmen wertvolle praktische und strategische Tips für das weitere Vorgehen in der

Region. Welches Unternehmen dann von uns mit Hilfe von Stoffstromnetzen in einem Teilbereich unterstützt wird, wird sich erst nach dem Workshop herausstellen.

### **Internetgestützte Börse für Komponenten und gebrauchte Produkte**

Der Bedarf an einer Börse für Produkt- und Komponentenrecycling, wie sie im Antrag formuliert wurde, ist zur Zeit nicht deutlich erkennbar. Unsere bisherigen Erkenntnisse lassen vermuten, dass zahlreiche Hemmnisse für die zögerliche Marktentwicklung bestimmender sind. Wir werden jedoch den regionalen Bedarf weiter untersuchen und gegebenenfalls den Weg für eine solche Börse vorbereiten.

#### **5.3.2.3 Ausblick: Flottenmanagement/Leasingkonzepte**

Leasingkonzepte können auf unterschiedlichster vertraglicher Ausgestaltung basieren. Gemeinsam ist für alle Formen, dass der Konsument „nur“ eine (Dienst-)Leistung bezieht und das Produkt selbst Eigentum des Herstellers oder Betreibers bleibt. Dies hat neben der engeren Kunden-Anbieterbeziehung weitreichend positive Effekte für eine nachhaltige Produktgestaltung. Es „...kann die Menge der hergestellten Produkte reduziert werden, ohne dass die Bedürfnisse der Kunden in Frage gestellt werden.“ Weiterhin „...erhöhen Leasingmodelle das Interesse des Herstellers an der Langlebigkeit und Recyclbarkeit der Produkte.“ (Stahel zitiert in Hopfenbeck, S. 269, 1995). Der derzeitige Stand des Leasings und Flottenmanagements entspricht aber noch nicht den propagierten Vorteilen. Der Grund für diese zögerliche Entwicklung könnte an den geringen Erfahrungen des Managements in diesen Bereichen liegen, da die (kalkulierbaren) Nachteile des größeren finanziellen Risikos, des Fungibilitätsrisikos und die vertragliche Komplexität leicht abschrecken könnten.

#### **Ansatzpunkte im Projekt**

Innerhalb des Projektrahmens sollen die über andere Arbeitsfelder bereits beteiligten Unternehmen für Leasingkonzepte sensibilisiert und anhand der Interessenslage in einer möglichen Umsetzung unterstützt werden. Von Unternehmen innerhalb des Projektrahmens bereits praktizierte Modelle (z.B. bei der Fa. Jungheinrich) sollen hier, ebenso wie bei der Modulbauweise, als motivierendes und übertragbares Beispiel verwendet werden. Dieser Aspekt einer nachhaltigen Produktstrategie entsteht aber gerade erst innerhalb der Unternehmenszusammenarbeit. Die Potentiale für praktische Erfolge im Zeitrahmen des Projekts sind derzeit noch nicht zu überschauen.

## 6 Zusammenfassung

Nach unserem Verständnis ist Nachhaltigkeit eine dreidimensionale Zielperspektive mit sozialer, ökologischer und ökonomischer Ausprägung. Nicht-Nachhaltigkeit ist dabei leichter zu beschreiben als Nachhaltigkeit. Defensiv formuliert heißt dies, dass ein Weg in die Zukunft nur dann nachhaltig sein kann, wenn er Systemzusammenbrüche in den sozialen, ökologischen und ökonomischen Systemen vermeidet.

Wir betrachten insbesondere die stofflichen Austauschbeziehungen zwischen Gesellschaft und Natur und sehen es als unser Ziel an, nicht nur Stoffkreisläufe enger zu führen, sondern einen Beitrag zur (Wieder-)Einbettung des gesellschaftlichen Stoffwechsels in den Naturhaushalt zu leisten, ohne dabei extreme Risiken (technologische, toxikologische, finanzielle, gesellschaftliche, ...) einzugehen oder die Tragfähigkeit der ökonomischen und sozialen Systeme zu überfordern.

Metalle, insbesondere Stahl, Kupfer und voraussichtlich noch Aluminium, stehen im Fokus unserer Arbeit. Sie bieten von ihren stofflichen Eigenschaften her ideale Voraussetzungen für lange Nutzungszeiten, Reparierbarkeit und Recycling auf gleichem Wertniveau. Durch das Bewertungskriterium ‚Entropische Effizienz‘ und die Einführung des Begriffs der „tendenziellen nachhaltigkeitsorientierten (ökologischen, sozialen und ökonomischen) Amortisation“ soll der Nutzen der Metalle in den jeweiligen Systemen auf die Entropieproduktion bzw. allgemeiner auf die Aufwendungen zur Erzeugung, Verarbeitung, Aufarbeitung und Aufbereitung bezogen werden. Die genaue Ausgestaltung des Konzepts der „nachhaltigkeitsorientierten Amortisation“ befindet sich noch in der Entwicklung.

Die Bewertung der Richtung von Innovationen soll durch das entwickelte Kriterienraster erfolgen. Die Zusammenstellung dieser Kriterien orientiert sich an ihrer Objektivierbarkeit, Handhabbarkeit, Fruchtbarkeit und Vollständigkeit. Diese Forderungen widersprechen sich teilweise. Das Kriterienraster muss im weiteren Verlauf noch ausdifferenziert, austariert und vor allem hinsichtlich seiner Handhabbarkeit praktisch überprüft werden. Wir werden dabei weiterhin einen Weg gehen, der sich aus einer Mischung aus Rückgriff auf Vorhandenes, Pragmatismus und eigenen grundsätzlichen Überlegungen zusammensetzt. Aus den Praxisprojekten wurden und werden darüber hinaus 'bottom-up' Kriterien entwickelt, die zu verbinden sind mit dem theoretischen und strategischen Überbau, aus welchem die top-down Kriterien abgeleitet wurden. Die Lücke, die zwischen diesen beiden Vorgehensweisen verbleibt, wird sich vermutlich kaum vollständig schließen lassen.

Aktueller Stand sind folgende vier Ebenen von Bewertungskriterien:

1. Ebene (Das ‚gute Leben‘):
  - a) die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit; b) je fünf abgeleitete Kriterien
2. Ebene (Entwicklungsfähigkeit und Vorsorge):
  - a) die systemtheoretischen Kriterien; b) die vorsorgeorientierten Kriterien
3. Ebene (Das ‚Überleben‘):
  - a) die an Tragekapazitäten und b) die an Wirkungsmodellen orientierten Kriterien
4. Ebene (Objekt- und Handlungsebene):
  - a) die stoffbezogenen Kriterien; b) die prozess- und produktbezogenen Kriterien.

Die Region Hamburg, auf die sich unser Forschungsprojekt bezieht, ist sicher keine ‚typische Metallregion‘. Trotzdem spielen Metalle in der Hamburger Wirtschaft eine besondere Rolle. Die Wirtschaftsstruktur der Hamburger Region ist bzw. war stark durch Seehafen und Handel geprägt. In jüngerer Zeit dominieren aber zunehmend andere Dienstleistungssektoren wie z. B. die Bereiche Medien und Werbung. Der Maschinenbau

in Hamburg, als eine der wichtigsten metallverarbeitenden Branchen, ist schwerpunktmäßig durch große Anlagenbauer und Vertriebsniederlassungen vertreten. Dem Maschinenbau gelingt es zunehmend, die Krise der vergangenen Jahre zu überwinden. Ungewöhnlich ist, dass alle drei großen Metallstoffströme durch einen großen Metallhersteller in der Region vertreten sind: durch die größte Kupferhütte Europas, durch gleich zwei Aluminiumwerke (allerdings kaum Aluminiumrecycling, weshalb wir diesbezüglich voraussichtlich in die Region Hannover ausweichen werden) und durch die Stahlwerke, die mit ihrem Elektroofen auf Stahlrecycling spezialisiert sind.

Das Projektdesign bewegt sich bewusst zwischen einem erkenntnisorientierten Forschungsprojekt und einem nutzenorientierten Umsetzungsprojekt. Aus dem Spannungsverhältnis von Theorie und Praxis ergeben sich wichtige Impulse aber auch besondere Schwierigkeiten. Die theoretischen Überlegungen müssen sich an ihrer Vermittelbarkeit und Umsetzbarkeit für die Praxis in Unternehmen messen lassen, und die in bzw. mit Unternehmen entwickelten und umsetzbaren Ideen werden auf ihren innovativen Gehalt, auf ihre Verallgemeinerbarkeit und natürlich insbesondere daraufhin geprüft, ob sie wirklich in Richtung Nachhaltigkeit gehen.

Als Strukturierungsmerkmal der Praxisprojekte haben wir thematische Zugänge gewählt: 1.) Stoffstrombezug, 2.) Prozessbezug, 3.) Regionsbezug und 4.) Produktbezug. Die von uns so strukturierten bearbeitbaren Teilprojekte haben wir anhand von „Erfolgskriterien“ gewichtet, um auf diese Weise zu einer möglichst rationalen Auswahl von vorrangig zu bearbeitenden Umsetzungsprojekten zu kommen.

Bei den stoffstromorientierten Ansätzen stehen Kupferrecyclingqualitäten, Stahlschrottreinigung sowie Kreislaufführung von Chrom und Nickel im Fokus unserer bisherigen Arbeit. Bei den prozessorientierten Ansätzen werden Schleifschlammrecycling, Strahlmittelabfallweiterverwendung und die optimierte Kühlschmierung bei der Metallbearbeitung eingehender betrachtet. Unser geplanter Zugang mit einem noch kleinräumigeren Bezug (Schwarzenbek, Bergedorf) führte bisher nicht zu einem konkreten Umsetzungsprojekt. Bei den sehr erfolgsversprechenden produktorientierten Ansätzen konzentrieren wir uns schließlich auf Nachhaltigkeitsorientierte Produkt(ions)strategien, bei denen wir zunächst die Modulbauweise sowie Produkt- und Komponentenrecycling intensiver bearbeiteten. Aufbauend auf diesen Praxisprojekten werden, als ein Instrument zur Analyse und Modellierung von Stoffströmen, Kosten und Umweltwirkungen, Modelle von Stoffstromnetzen auf der Basis von UMBERTO erarbeitet und methodisch weiterentwickelt.

Trotz komplexer Projektorganisation soll ein intensiver interdisziplinärer Austausch der vier wissenschaftlichen Verbundpartner untereinander sowie mit den Praxispartnern gepflegt und gefördert werden. Dies ist eine wichtige aber auch zeitintensive Aufgabe. Ein hohes Maß an Eigenverantwortlichkeit und Selbstorganisation schafft eine kreative und innovationsförderliche Atmosphäre für die thematischen Projektgruppentreffen und die organisatorischen Steuerungsgruppentreffen. Unterstützt wird unsere Zusammenarbeit durch den intensiven Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (nicht nur Email und eigene Homepage, sondern auch Hyperwaveserver mit zentraler netzzugängiger Informations-, Dokumenten- und Literaturdatenbank).

Für die Verankerung und den Rückhalt des Projektes in der Region sowie für die Unterstützung bei der Verbreitung und Umsetzung der Projektergebnisse wurde ein Projektbeirat gegründet, der mit hochrangigen Vertretern Hamburger Institutionen besetzt ist (ein zweites Beiratstreffen wird auf der Basis dieses Zwischenberichts in Kürze stattfinden).

## 6.1 Ausblick

Auf der theoretischen Ebene werden wir die Systematik der Nachhaltigkeitskriterien weiterentwickeln und zentrale Begriffe wie z.B. „die tendenzielle nachhaltigkeitsorientierte Amortisation“ präzisieren. Gerade für die detailliertere Ausgestaltung aber auch hinsichtlich der Anwendbarkeit des Kriterienrasters sind noch vertiefende Diskussionen notwendig, die hoffentlich auch mit einem größeren Kreis von Experten im Rahmen einer Nachhaltigkeitstagung der ‚Modellprojekte nachhaltigen Wirtschaftens‘ geführt werden können (wie mit dem die Programmbegleitung durchführenden ISOE-Institut Frankfurt schon andiskutiert).

Als weiteres wichtiges Forschungsfeld bleibt die Untersuchung der Interventionsmöglichkeiten zur Verbesserung der Innovationsfähigkeit von Unternehmen und Regionen in Verbindung mit dem Leitbild des Nachhaltigen Wirtschaftens. Hierzu hoffen wir auch auf weitere Erkenntnisse und freuen uns ggf. auf die Zusammenarbeit mit Projekten des BMBF-Förderschwerpunkts ‚Integrierter Umweltschutz - Rahmenbedingungen für Innovationen zum Nachhaltigen Wirtschaften‘.

Die nächsten praktischen Schritte sind die Organisation und inhaltliche Ausgestaltung eines Doppelworkshops zur Einführung von modularer Bauweise insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen in der Region und zu den Möglichkeiten des Produkt- und Komponentenrecyclings (Juni 2000). Auf diesem Workshop wird sicher eine Vorentscheidung darüber fallen, wie weitgehend, bzw. auf welcher Ebene, eine betriebsübergreifende Kooperation auf diesem hochsensiblen Gebiet der Produktentwicklung möglich ist. Ein weiterer Workshop ist zum Thema Minimalmengenschmierung bzw. Trockenbearbeitung angedacht. Auf diesem Gebiet haben sich in den letzten Wochen interessante Kooperationsmöglichkeiten mit zwei mittelständischen Unternehmen und mit dem Institut für Fertigungstechnik an der FH Hamburg eröffnet. Weiterhin sind wir die Ausrichter des im Mai 2000 stattfindenden internen Workshops der Stoffstrommanagement-Projekte unseres Förderschwerpunkts (BMBF: Modellprojekte für regionales Stoffstrommanagement). Es geht dabei um die Frage, welche Rolle Modellierung im Rahmen von Stoffstrommanagementprojekten spielen kann und welche Erfahrungen mit den verschiedenen, bisher schon in den Projekten verwendeten, Modellierungsansätzen und Softwaretools (z.B. Audit, GaBi, GIS, Perseus, Umberto) gesammelt wurden.

Neben der Pflege der bestehenden und der schon angebahnten Unternehmenskontakte steht ggf. ein weiterer (durch unsere personellen und finanziellen Kapazitäten jedoch stark beschränkter) Ausbau der Unternehmenskontakte an, insbesondere mit Unternehmen der Stahl- und der Aluminiumkette aber auch mit dem Kraftfahrzeuggewerbe. Letzteres könnte in Verbindung mit der Automobilproduktion besonders wichtig werden, falls wir uns stärker auf das Automobil als Produkt einlassen sollten. Eine solche Entscheidung, die sich aus der Bearbeitung des Stahlstroms heraus aufdrängen könnte (Automobil als Hauptquelle der Kupferverunreinigungen im Stahlschrott), steht allerdings noch aus. Eine wünschenswerte Alternative zu diesem Weg würde sich allerdings dann eröffnen, wenn es uns doch noch gelänge, die jetzigen mehr oder weniger ‚bilateralen‘ Kooperationen zu überbetrieblichen Innovationssystemen auszubauen, auch wenn wir es dann nicht mit einem so ‚repräsentativen‘ Produkt wie dem Automobil, sondern weiterhin ‚nur‘ mit Flurförderfahrzeugen und Werkzeugmaschinen zu tun hätten.

Ganz ohne Zweifel besteht derzeit noch eine Lücke bzw. ein Bruch zwischen den sehr anspruchsvollen und weitreichenden Überlegungen des theoretischen Teils und den doch recht kleinen Schritten im praktischen Teil, wie z. B. der Verbreitung der Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung in den Unternehmen der Region. Diese Lücke voll-

ständig zu schließen, wird wohl auch in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit nur unvollständig gelingen. Immerhin wird neben den kurzfristig möglichen Verbesserungen bei den Metallnebenstoffströmen, den mittelfristig angelegten Produktstrategien auch noch die langfristig angelegte Strategie des Backcasting eine vermittelnde Rolle einnehmen können. Das Backcasting ist im Unterschied zum Forecasting keine Zukunftsprognose, sondern man geht von einem in der Zukunft zu erreichenden Ziel aus und fragt dann in Richtung Gegenwart, was wann spätestens geschehen muss, wenn man das gesetzte Ziel erreichen will. Das von uns mit diesem Verfahren anvisierte Ziel ist dabei das Szenario einer Metallwirtschaft im Jahre 2050, die nur noch mit 10% Frischware pro Recyclingumlauf auskommt, und die ihre gesamten Stoff- und Energieumsätze im Vergleich zum Jahre 2000 um den Faktor 4-10 gesenkt hat.

## **6.2 Erstes Fazit**

Die strategischen Ansatzpunkte des Stoffstrommanagements auf der betrieblichen Ebene des Nachhaltigen Wirtschaftens, liegen nicht so sehr auf den bisher aus ökologischer Sicht vornehmlich bearbeiteten Gebieten wie Emissionen und Abfallwirtschaft, sondern viel stärker bei der Materialwirtschaft insgesamt und vor allem bei der Produktgestaltung, also bei denjenigen Unternehmensabteilungen, die für Einkauf, Qualitätssicherung und die Erstellung von Pflichtenheften für Prozesse, Anlagen und Produkte zuständig sind. Die Umweltbeauftragten in den Unternehmen sind nicht mehr die alleinigen Ansprechpartner. Sie leisten aber natürlich nach wie vor einen wesentlichen Beitrag, insbesondere dann, wenn sie die (über-)betriebliche Produktlinie im Blick haben.

Die Beteiligung von Unternehmen an einem Forschungsprojekt zum ‚Nachhaltigen Wirtschaften‘ ist nicht selbstverständlich. Zentrale Erfolgsfaktoren für Unternehmenskooperationen sind ‚persönliches Vertrauen‘, welches Zeit und Pflege zum Aufbau benötigt, ein ‚benennbarer Nutzen‘, eine ‚klare Rollendefinition‘ und ein ‚schrittweiser Ausbau der Kooperationsintensität‘. In der Praxis im direkten Unternehmenskontakt ist es entscheidend, die ökonomische Realität zu beachten, auch wenn sie zunächst vergleichsweise kurzfristig ausgerichtet ist. Allerdings kann in der heutigen Wettbewerbssituation längst davon ausgegangen werden, dass Markterfolg und Wettbewerbsfähigkeit von sehr viel mehr abhängt, als von Herstellungskosten und Produktpreis. Dass Unternehmen Geld verdienen (Profite machen) müssen, ist klar, aber wie man in der heutigen Zeit am besten Geld verdienen und (auch längerfristig Profite machen) kann, ist so unklar wie nie zuvor. Dies herauszufinden ist Aufgabe einer längerfristig angelegten Unternehmensstrategie, und in diese muss der Nachhaltigkeitsgedanke eingebettet werden, so wie das vor Jahren schon mit der ‚Sozialpartnerschaft‘ geschehen ist und derzeit mit ‚ökologischen Aspekten‘ geschieht.

Strategisch gesehen verfolgen wir also einen klaren Modernisierungsansatz. Um mit unseren ‚normativen‘, d. h. insbesondere den sozialen und ökologischen Nachhaltigkeitsanliegen nicht allein auf Appelle und die Einsichten besonders verantwortungsvoller Unternehmer und Verbraucher angewiesen zu sein, setzen wir an dem ureigensten Überlebensinteresse - an der Wettbewerbsfähigkeit - von Unternehmen an. Mit den im Zuge der Globalisierungsfolgen und zusätzlicher Veränderungen auf den Märkten ohnehin nötigen ökonomisch-funktionalen Modernisierungen versuchen wir, die anstehenden ‚normativen‘ sozialen und ökologischen Modernisierung von Anfang an zu verbinden. In der Umsetzung bedeutet das bei unserem Fokus: Verbesserung der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit von Prozessen und Produkten und - sozusagen als Voraussetzung hierfür - Verbesserung der Innovationsfähigkeit von Unternehmen und Unternehmensclustern in der Untersuchungsregion.

## 7 Literaturverzeichnis

- Australian Stainless Steel Development Association: Stainless Steel.  
[Http://www.assda.asn.au/](http://www.assda.asn.au/)
- Ayres, Robert U.; Ayres, L: Industrial Ecology Towards Closing The Natural Cycles.  
London 1996
- Bossel, Hartmut: Ökosystemar basierte Leitbilder für eine Nachhaltige Entwicklung.  
Handbuch der Umweltwissenschaften, 1999.
- Bossel, Hartmut: Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum  
Verhalten dynamischer Systeme. Braunschweig [u.a.], Vieweg, 1994.
- Bukold, Steffen; Thinnies, Petra: Boomtown oder Gloomtown Strukturwandel einer  
deutschen Metropole: Hamburg. Berlin, Rainer Bohn Verlag, 1991.
- Bukold, Steffen; Thinnies, Petra: Maschinenbau in der Region Hamburg, Regionale  
Verflechtung und das Süd-Nord-Gefälle. In: Boomtown oder Gloomtown?  
S. 189..212, Berlin: Rainer Bohn Verlag, 1991.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffwirtschaftliche  
Länderstudien, XXI Bundesrepublik Deutschland - Rohstoffsituation 1998.
- Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.:  
Recycling, Fachbuch Stahlrecycling. 1998.
- Conrardini, R.; Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen.  
1999.
- Deecke, Helmut; Krüger, Thomas; Läßle, Dieter: Alternative Szenarien der wirtschaftlichen  
Strukturentwicklung in der Hamburger Wirtschaft unter räumlichen Gesichtspunkten. 1993.
- Deutsches Institut für Normierung: EN ISO 14001. Umweltmanagementsysteme.  
Spezifikation mit Anleitung zur Anwendung. Berlin, Beuth Verlag, 1996.
- Dieter, Hermann, H.: Verkommt die Ökosphäre zum ökotoxikologischen Großlabor?  
Düsseldorf, 1984.
- Donner, Petra: Kreislauf der Metalle - Eisen und Stahl in: Recycling - materialwissen-  
schaftliche Aspekte.
- EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anfor-  
derungen. Brüssel, 1997.
- Ehrenfeld, John R.: Industrial Ecology: A Framework for Product And Process Design;  
<http://web.mit.edu/org/ctpid/www/people/Ehrenfeld.htm>, Zugriff?
- Erkman, Suren: Industrial Ecology - A Historical View In: Journal of Cleaner Production,  
Vol. 4 No 4,1997
- Fleig, Jürgen: Zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft: mit Nutzenverkauf, Langlebigkeit und  
Aufarbeitung ökonomisch und ökologisch Wirtschaften. Stuttgart, 2000.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und  
Halbzeugen, Teil III Metalle - Kupfer, München, Juli 1999
- Gemeinschaften, Europäische: Stahlverbrauch nach Verbrauchsbereichen 1974-1994.  
1997.
- Gierse, F. J.: Bausteinesysteme - universelles Werkzeug zur Effizienzsteigerung in  
Industrieunternehmen. In: VDI Berichte 1510: Plattformkonzepte auch für Kleinserien  
und Anlagen? S. 1..27, Verein Deutscher Ingenieure Düsseldorf: VDI Verlag, 1999.



- Gleich, A. von: Wissenschaft und Technik als Mitverursacher und Bewältiger der ökologischen Krise? In: Industrialismus und Ökonomie - Geschichte und Perspektiven der Ökologisierung. Hassenpflug, D. Wiesbaden: Deutscher Universitäts Verlag, 1991.
- Gleich, Arnim von: Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? 1998.
- Gleich, A. von: Der wissenschaftliche Umgang mit der Natur. Über die Vielfalt harter und sanfter Naturwissenschaften. Forschung, Campus Frankfurt/M.: Universität Hannover, 1989.
- Gleich, Arnim von: Ökologische Kriterien der Technik- und Stoffbewertung. Integration des Vorsorgeprinzips (Teil I - III), in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, 1998-1999.
- Hamburger Stahlwerke: <http://www.ispat.com/defaultsubsidiary.htm>, Zugriff: März 2000.
- Handelskammer Hamburg (Hrsg.): Metropolregionen im Wettbewerb. Hamburg, 2000.
- Hopfenbeck, Waldemar; Jasch, Christine: Öko Design - Umweltorientierte Produktpolitik. Landsberg/Lech, 1995.
- ifu - Institut für Umweltinformatik Hamburg: Umberto Version 3.0, 1998
- IISD - International Institute for Sustainable Development: Compendium of Sustainable Development Indicator Initiatives and Publications.  
<http://iisd.ca/measure/compinfo.htm>
- Jepsen, D.; Sander, K.: Vergleich unterschiedlicher Verwertungsverfahren für kühl-schmierstoffbehaftete Metall-Schleifschlämme. Hannover, Ökopol im Auftrag vom Niedersächsischen Umweltministerium, 1993.
- Jepsen, D.; Sander, K.: Umweltbezogene Bewertung des Einsatzes v. Schleifschlämmen in Gießereiofen. Ökopol im Auftrag vom Institut für Gießereitechnik GmbH, 1995.
- Jonas, H.: Das Prinzip Verantwortung - Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation, Frankfurt/M 1979. Frankfurt/M, 1997.
- Jonas, H.: Warum die moderne Technik ein Gegenstand für die Ethik ist. S. 42 Technik, Medizin und Ethik. Zur Praxis des Prinzips Verantwortung, Frankfurt/M, 1985.
- Kraftfahrt –Bundesamt Flensburg: Kraftfahrzeuge Jahresband. Stuttgart, 1998.
- Kraftfahrt –Bundesamt Flensburg: <http://www.kba.de>, Zugriff: März 2000.
- Krüger, Thomas: Ökonomischer Strukturwandel in der Region Hamburg - Theorie und Empirie. In: Boomtown oder Gloomtown? S. 29..70 Bukold, Steffen; Thinnies, Petra. Berlin: Rainer Bohn Verlag, 1991.
- Läpple, Dieter; Bukold, Steffen; Endres, Egon: Maschinenbau in der Region Hamburg. Hamburg: TU Hamburg-Harburg, AB Stadtökonomie, 1990.
- Lewin, B.: CO<sub>2</sub>-Emissionen von Energiesystemen zur Stromerzeugung unter Berücksichtigung der Energiewandlungsketten. In: Bergbau und Geowissenschaften. Berlin: TU Berlin, 1993.
- Liedtke, C., Merten, T., Kuhndt, M. Und Baku, B.: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (3) Die Stahlveredler (Ferro)-Chrom und (Ferro)-Nickel. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 1995.
- Meffert, Heribert; Kirchgeorg, Manfred: Marktorientiertes Umweltmanagement. Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag, 1998.

- Merten, T., Liedtke, C., Schmidt-Bleek, F.: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (1). Die Werkstoffe Beton und Stahl - Materialintensität von Freileitungsmasten. Wuppertal, Wuppertal-Institut für Klima Umwelt Energie, 1995.
- Meyer, L. u.a.: Stahl im Automobilbau. Düsseldorf, Stahl und Eisen, 1999.
- Mittelstraß, J.: Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. Mannheim/Wien/Zürich, B.I. Wissenschaftsverlag, 1984.
- Möller, Andreas: Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Hamburg, Universität Hamburg, 1999.
- Müller-Reißmann, K.F.; Bossel, H.: Kriteriensystem zur Bewertung von neuen Informations- und Kommunikationstechniken und ihrer Alternativen. Hannover, 1987.
- Müller-Reißmann, K.F.; Bossel, H.: Kriterien für Energieversorgungssysteme. Hannover, 1979.
- Münster, H.P.: Taschenbuch des Metallhandels. 1997.
- Norddeutsche Affinerie: unsere Strategie. [Http://www.Norddeutsche-Affinerie.de/htm/unternehmen/ueberuns/unserestrategie.htm](http://www.Norddeutsche-Affinerie.de/htm/unternehmen/ueberuns/unserestrategie.htm).
- Norddeutsche Affinerie: Über uns. [Http://www.Norddeutsche-Affinerie.de/htm/unternehmen/ueberuns.htm](http://www.Norddeutsche-Affinerie.de/htm/unternehmen/ueberuns.htm).
- Norddeutsche Affinerie: Gesprächsprotokoll vom 27. Juli 1999.
- Noro, K et. al.: ISIJ International, 1997.
- OECD: Frameworks to Measure Sustainable Development – An OECD Expert Workshop. Paris, 1999.
- Pawlek, F.: Metallhüttenkunde. Berlin, de Gruyter, 1983.
- Philipp, J. A. et.al: Recycling in der Stahlindustrie; In :Stahl & Eisen 12 (112), 1992
- Philipp, J. A. et.al.: Fortschreibung der Ökobilanz für Stahlprodukte; In: Stahl & Eisen 11 (116), 1996
- Philipp, J. A. et.al.: Ökobilanzen für Stahlprodukte - Sachstand und Perspektiven; In: Stahl & Eisen 11 (114), 1994
- Pohl, W.: W.&W.E. Petrascheck's Lagerstättenlehre. Eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzen. Stuttgart, 1992
- Politische Ökologie: Nachhaltigkeit - öffne dich! Heft 63/64, München, 2000.
- Reichmann, Thomas: Controlling mit Kennzahlen. Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption. München, 1985.
- Ritter, J.: Gründer, K.: Historisches Wörterbuch der Philosophie, Bd. 4, Stichwort Kriterium (Autor T. Borsche). 1976.
- Röhm, T.: Der Energieaufwand zur Herstellung des Energieautarken Solarhauses Freiburg. Institut für Chemische Verfahrenstechnik, 1993.
- Roloff, W.: Plattformkonzepte auch für Kleinserien und Anlagenbau? Wirtschaftlich meßbare Nutzervorteile bestimmen Investitionsmodule. In: VDI Berichte 1510: Plattformkonzepte auch für Kleinserien und Anlagenbau? S. 197..208, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf: VDI Verlag, 1999.
- Rubik, Frieder; Teichert, Volker: Ökologische Produktpolitik: von der Beseitigung von Stoffen und Materialien zur Rückgewinnung in Kreisläufen. Stuttgart, Schäffer-Poeschel, 1997.

- Savov, L., Janke, D.: Recycling of scrap in steelmaking in view of the tramp element problem. In: Metall, 52. Jahrgang, Nr. 6/98.
- Schmidt, M.; Schorb, A.: Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 1995.
- Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - Das Maß für ökologisches Wirtschaften. Berlin, Birkhäuser 1994.
- Schöne, Siegfried (bearb.): Vom Pfeffersack zum Wirtschaftsingenieur. Hamburg, Handelskammer Hamburg, 1989.
- Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe. Fachserie 4, Reihe 8.1 Eisen und Stahl, 1999.
- Statistisches Landesamt Hamburg: Zeitreihen 1970 bis 1998. Zugriff: 31.03.00.
- Statistisches Landesamt Hamburg: Hamburger Statistisches Jahrbuch 1999/2000. Hamburg, Statistisches Landesamt, 1999.
- Statistisches Landesamt Hamburg: Hamburg - Ein Stadtporträt in Zahlen. Zugriff: 2.12.99.
- Stock, D.; Bögel, A.: Kupferwerkstoffe im Kraftfahrzeugbau.
- Teichert, Volker: Entwicklung von Indikatorensystemen zur (regionalen) Nachhaltigkeit. In: TA-Datenbank-Nachrichten. 2000.
- U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries, Chromium. 1999.
- Ullrich, W., Schicks, H.: Aspekte zum Recycling von metallisch beschichtetem Stahl.
- Umweltbundesamt: Stoffstrommanagement in der Eisen- und Stahlindustrie - Konkretisierung des §5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG.
- Umweltbundesamt: Stoffstrommanagement in der Eisen und Stahlindustrie. 1996.
- Umweltbundesamt (UBA): Ökobilanzen für Produkte. Bedeutung - Sachstand - Perspektiven, erarbeitet von der Arbeitsgruppe Ökobilanzen. UBA Texte, 92, 1992.
- VDI-Gesellschaft Systementwicklung und Projektgestaltung: Plattformkonzepte auch für Kleinserien und Anlagen?: Tagung Stuttgart, 12. und 13.10.1999. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1999.
- VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Das Gebrauchtmaschinengeschäft - Strategien, Konzepte, Fallbeispiele. Frankfurt/M., VDMA Verlag, 1999.
- VDEh - Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Jahrbuch Stahl 2000. 1999.
- VDEh - Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Jahrbuch Stahl 1997. 1996.
- VDEh - Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Kumulierter spezifischer Primärenergiebedarf von Stahlprodukten. Informationsbroschüre, 1992.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI-Richtlinie 3780 'Empfehlungen zur Technikbewertung'. 1989.
- Weizsäcker, Christine von; Weizsäcker, Ernst U. Von: Fehlerfreundlichkeit als evolutionäres Prinzip und ihre mögliche Einschränkung durch die Gentechnologie. In: Die ungeklärten Gefahrenpotentiale der Gentechnologie. Kollek, R.; Tappeser, B. u. a. München: J. Schweitzer Verlag, 1986.
- Willeke, R. et al.: Stahl u. Eisen 4 (114) 1994 aus: Savov, L., Janke, D. In: Metall, 52. Jahrgang, Nr. 6/98.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl: Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1998. 1998.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU):  
Welt im Wandel. Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme. Bremerhafen, 1995.

www.amm.com: American Metal Market: Nickel. [Http://www.amm.com/ref/nickel.htm](http://www.amm.com/ref/nickel.htm),  
Zugriff: 2000.

www.amm.com: American Metal Market: Chrom. [Http://www.amm.com/ref/chrom.htm](http://www.amm.com/ref/chrom.htm),  
Zugriff: 2000.

www.diw.de: Chrom. [Http://www.diw.de/diwwbd/00-03-1.html#HDR6](http://www.diw.de/diwwbd/00-03-1.html#HDR6).

www.worldsteel.org: Stainless steel productions statistics 1997.