

Fachbereich Informatik der Universität Hamburg

Vogt-Kölln-Str. 30 – D-22527 Hamburg / Germany

University of Hamburg – Computer Science Department

Bericht Nr. 184 • Report No. 184

**Konzeption eines Systems zur Abschätzung der  
Auswirkungen verkehrsbezogener Maßnahmen  
auf die Umwelt**

**Lorenz M. Hilty, Bernd Page, Ruth Meyer, Holger Mügge,  
Helmut Deecke, Martina Poll**

FBI-HH-B-184/96

April 1996

In die Reihe der Berichte des Fachbereichs Informatik aufgenommen durch  
Accepted for Publication in the Report Series of the Department of Computer Science by

Prof. Dr. W. Lamersdorf und Prof. Dr. B. Wolfinger

## Impressum

Berichte aus dem Forschungsprojekt MOBILE (Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment) erscheinen als Reports des Fachbereichs Informatik der Universität Hamburg. Sie sind durch Untertitel der Form „MOBILE-Report *n*“ gekennzeichnet.

Das Projekt wird von der Volkswagen-Stiftung im Rahmen des Förderschwerpunktes „Umwelt als knappes Gut – Steuerungsverfahren und Anreize zur Schadstoff- und Abfallverringerung“ gefördert. Laufzeit: Anfang 1995 bis Ende 1997.

## Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Ausgangspunkt und Zielsetzung des Projekts MOBILE .....                                      | 1  |
| 2     | Vom „Vier-Stufen-Algorithmus“ der Verkehrsprognose zum MOBILE-Ansatz .....                   | 3  |
| 2.1   | Der traditionelle „Vier-Stufen-Algorithmus“ (VSA).....                                       | 3  |
| 2.2   | Erweiterung des VSA um Modelle der Umweltbelastung .....                                     | 6  |
| 2.3   | Modellbildung nach dem Baukastenprinzip .....  | 11 |
| 2.3.1 | Vereinheitlichung der Modellschnittstellen .....   | 12 |
| 2.3.2 | Atomisierung der Modelle, hierarchische Modellierung .....                                   | 13 |
| 2.3.3 | Flexibilisierung des räumlichen und zeitlichen Aggregationsniveaus .....                     | 15 |
| 2.3.4 | Einbeziehung individuenbasierter Modelle und Akteursmodellierung .....                       | 16 |
| 2.4   | Flexibilisierung der Modellexperimente .....   | 17 |
| 2.4.1 | Szenarienvergleich .....   | 19 |
| 2.4.2 | Experimente mit konkurrierenden Modellen .....   | 21 |
| 3     | Architektur des MOBILE-Systems .....   | 22 |
| 3.1   | Das System aus Sicht des Modellanwenders: ein dynamisches GIS.....                           | 23 |
| 3.2   | Das System aus Sicht des Modellentwicklers: ein objektorientiertes Modellierungssystem ..... | 26 |
| 4     | Stand der Realisierung .....   | 27 |
| 5     | Ausblick .....   | 29 |
| 5.1   | Anwendungsgebiet City-Logistik .....   | 29 |
|       | Literatur .....  | 31 |
|       | Anhang A: Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen .....                                      | 34 |
|       | Anhang B: MOBILE im WWW.....   | 35 |

# **Konzeption eines Systems zur Abschätzung der Auswirkungen verkehrsbezogener Maßnahmen auf die Umwelt**

## **MOBILE-Report Nr. 1**

Lorenz M. Hilty, Bernd Page, Ruth Meyer, Holger Mügge, Helmut Deecke, Martina Poll  
Fachbereich Informatik, Universität Hamburg  
Vogt-Kölln-Str. 30, D-22527 Hamburg

{hilty | page} @informatik.uni-hamburg.de

### **Zusammenfassung**

Dieser Bericht faßt die Ergebnisse des ersten Jahres des MOBILE-Projekts zusammen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Systems zur umweltbezogenen Modellbildung und Simulation im Bereich Verkehr und Logistik. Ausgehend vom traditionellen „Vier-Stufen-Algorithmus“ der Verkehrsprognose und einer umweltbezogenen Erweiterung dieses Ansatzes beschreiben wir den objektorientierten Modellierungsansatz von MOBILE. Die Architektur des MOBILE-Systems integriert ein Geographisches Informationssystem (GIS) in eine Modellierungs- und Simulationsumgebung. Das GIS wird für die Repräsentation und Visualisierung der raumbezogenen Daten verwendet. Eine Modellbank stellt Bausteine für Simulationsmodelle im Bereich Verkehr und Umwelt zur Verfügung. Ein Prototyp des Systems ist zur Zeit durch eine lose Kopplung eines Teils der vorgesehenen Komponenten realisiert.

### **Abstract**

This report summarizes the results of the first year of the MOBILE project. The goal of this project is to develop a system for environment-oriented simulation modelling in the field of traffic and logistics. Starting from the traditional „four stage transport model“ for traffic forecast and an environment-oriented extension of this approach, we describe the object-oriented modelling approach of MOBILE. The MOBILE system architecture integrates a geographic information system (GIS) into a simulation modelling environment. The GIS is used for the representation and visualization of the spatial data. A model base provides building blocks for simulation models in the field of traffic and environment. A system prototype has been realized by loosely coupling some of the intended components.



# 1 Ausgangspunkt und Zielsetzung des Projekts MOBILE

Verkehr ist ein komplexes Phänomen, das auf Versuche der gezielten Beeinflussung teilweise kontra-intuitiv reagiert. Es ist daher nicht verwunderlich, daß Verkehrsprozesse und -systeme seit Jahrzehnten Gegenstand der computergestützten Modellbildung und Simulation sind. Die verschiedenen politischen und wirtschaftlichen Akteure verwenden dabei sehr unterschiedliche Modelle, die ihrer jeweiligen Problemstellung und Zielsetzung angepaßt sind. Beispielsweise nutzen die Kommunen Modelle zur Verkehrsplanung, die in der Regel die Verkehrsnachfrage als gegeben voraussetzen und die Planung des Verkehrsangebots (Infrastruktur für den Individualverkehr sowie ÖPNV-Angebot) unterstützen. Unternehmen verwenden Logistikmodelle, die die Sicherstellung der sogenannten „vier r“ der Logistik (die richtigen Güter im richtigen Zustand zur richtigen Zeit am richtigen Ort) kostenoptimal zu realisieren helfen.

Der Verkehr hat sich, wenn man vom Nachrichtenverkehr absieht, zu einer Hauptursache der Umweltbelastung in modernen Industriestaaten entwickelt. Den größten Anteil daran hat der Straßenverkehr. Entlastungseffekte durch technische Maßnahmen wie den Abgaskatalysator für Pkw wurden durch die Zunahme des Verkehrs weitgehend kompensiert. Der Energieverbrauch des Verkehrs ist seit den fünfziger Jahren dramatisch angestiegen (s. □Abb. 1-1). Diese Zunahme ist hauptsächlich auf die gestiegenen Fahrleistungen (insgesamt zurückgelegte Kilometer), aber auch auf die Verschiebung der Verkehrsteilung (des Modal Split) von nichtmotorisierten zu motorisierten Verkehrsmitteln sowie von der Schiene zur Straße zurückzuführen.

Weder die Industrieproduktion noch die Privathaushalte verzeichnen heute so hohe Zuwächse im Verbrauch fossiler Energieträger wie der Verkehrssektor. Deshalb stellt sich immer dringender das Problem, die Auswirkungen verkehrsrelevanter Maßnahmen auf Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung im voraus abzuschätzen und von mehreren Alternativen die ökologisch günstigste zu bestimmen. Hierbei kann unter anderem die computergestützte Modellbildung und Simulation Hilfestellung leisten (vgl. Hilty 1994).

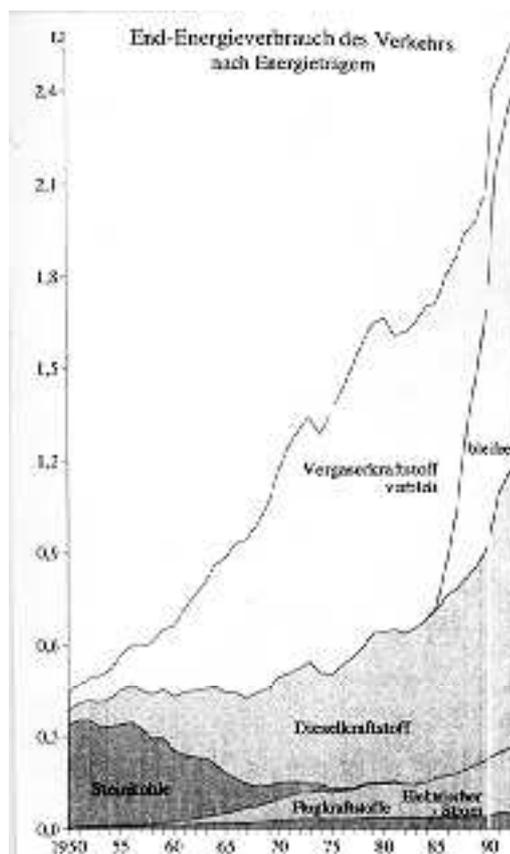


Abb. 1-1: End-Energieverbrauch des Verkehrs in der Bundesrepublik Deutschland 1950-1993, seit 1990 einschließlich der neuen Bundesländer (aus: Bundesminister für Verkehr 1994, S. 297)

Die bisher verfügbaren, zum Teil in kommerzielle Softwareprodukte eingebetteten *traditionellen Modelle der Verkehrsplanung* erweisen sich für diese Aufgabe als zu wenig flexibel. Sie geben häufig eine bestimmte Sicht der relevanten Systemzusammenhänge wieder, die sich der Anwender zu eigen machen muß, will er aus dem jeweiligen Softwareprodukt Nutzen ziehen. Die Einflußmöglichkeiten des Benutzers sind in der Regel auf Dateneingabe und Parametervariationen beschränkt. Ein schwerwiegender Nachteil dieser „fest verdrahteten“ Modelle ist auch die Tatsache, daß entscheidende Modellannahmen nicht transparent werden, so daß die Ergebnisse nur schwierig mit den zugrundeliegenden Voraussetzungen in Verbindung zu bringen sind. Viele Einschränkungen, die bei solchen Modellen gemacht werden, haben zudem technische (und damit nicht theoretische oder empirische) Gründe, d.h. sie stammen noch aus Zeiten knapper Rechenzeit- und Speicherplatzressourcen und ergonomisch unzulänglicher Benutzungsoberflächen.

Wir haben uns daher mit der Frage beschäftigt, ob die Informatik nicht auf heutigem Stand der Technik bessere Lösungen zur Modellierung von Verkehrs- und Logistikprozessen unter Umweltaspekten anbieten kann. Insbesondere sollte das Modellierungsproblem allgemeiner gelöst werden, nämlich durch ein Werkzeug, das die *Modellierung von Raum- und Zeitüberbrückungsprozessen (d.h. logistischen Prozessen)* und der durch sie bedingten Umweltbelastung mit einem allgemeinen Ansatz unterstützt und der jeweiligen Problemstellung des Anwenders mit möglichst geringem Aufwand angepaßt werden kann.

Diese Überlegungen führten zur Konzeption des Projekts „Instrumente für die ökologische Bewertung und Gestaltung von Verkehrs- und Logistiksystemen“, das seit Anfang 1995 von der Volkswagen-Stiftung gefördert wird und auf drei Jahre angelegt ist. Das Projekt trägt inzwischen die etwas kompaktere Bezeichnung MOBILE (Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment).

*Ziel des Projekts* ist die Entwicklung eines Systems, das die Auswirkungen verkehrsrelevanter Maßnahmen auf die Umwelt abzuschätzen hilft. Den Kern des Systems bildet ein objektorientiertes Modellbanksystem mit zugehöriger Simulationssteuerung. Dieses stellt dem Anwender Modellbausteine mit einheitlichen Schnittstellen zur Verfügung, die er nach Bedarf zu neuen, seiner spezifischen Problemstellung angepaßten Modellen verknüpfen kann. Mit diesen führt er anschließend Experimente durch, d.h. er simuliert die für seine Problemstellung relevanten Szenarien. Die durch Verknüpfung entstandenen Modelle werden wiederum in der Modellbank abgelegt und stehen zur Wiederverwendung in späteren Simulationsstudien zur Verfügung. Auch die Implementation neuer elementarer Bausteine oder die nachträgliche Einbettung externer (außerhalb des Systems entstandener) Modelle ist möglich, erfordert jedoch einigen Anpassungsaufwand. Neben dem Modellbanksystem ist ein Geographisches Informationssystem (GIS) in das System integriert, so daß die raumbezogene Modellierung auf dem heutigen Stand der Technik unterstützt wird.

Im Rahmen des Projekts führen wir parallel zur Systementwicklung praxisorientierte *Fallstudien* durch, die einen eigenen Anwendungsnutzen haben und gleichzeitig zur Präzisierung der Anforderungen und zur Evaluation von prototypisch realisierten Systemkomponenten dienen.

## 2 Vom „Vier-Stufen-Algorithmus“ der Verkehrsprognose zum MOBILE-Ansatz

Wer sich mit Verkehrsmodellierung beschäftigt, begegnet früher oder später dem sogenannten „Vier-Stufen-Algorithmus“ der Verkehrsprognose (engl. „four-stage transport model“). Dieser Ansatz nimmt in der traditionellen Verkehrsplanung eine zentrale Stellung ein (vgl. Hensel 1978, für eine kritische Darstellung auch Albrecht et al. 1992 und Ortuzar/Willumsen 1994). Obwohl dieser aus den sechziger Jahren stammende Ansatz durch Fortschritte in der Verkehrswissenschaft überholt wurde, bildet er bis heute, wenn auch mit einigen Modifikationen, die Grundlage kommerzieller Verkehrsplanungs-Software.<sup>1</sup>

Der Vier-Stufen-Algorithmus (VSA) ist in einer Zeit entstanden, in der Verkehrspolitik noch unumstritten einem Leitbild folgte, das Ökonomen als *angebotsorientierte Verkehrspolitik* bezeichnen (vgl. Minsch 1992). Diese Politik betrachtet es als ihre Aufgabe, die zukünftige Nachfrage nach Verkehrsleistung zu prognostizieren und das Verkehrsangebot (Infrastrukturkapazitäten, öffentliche Verkehrssysteme) der erwarteten Nachfrage entsprechend auszubauen. Nicht selten wurde dadurch die Nachfrage nach Verkehrsleistungen erst stimuliert. Diese Verkehrspolitik gilt heute aus ökonomischen und ökologischen Gründen als überholt.

Wir entwickeln im folgenden den MOBILE-Ansatz der Verkehrs- und Umweltmodellierung in Abgrenzung zum VSA. Diese Vorgehensweise hat hauptsächlich didaktische Gründe: Ausgehend vom VSA läßt sich unser Ansatz durch eine *Verallgemeinerung* der Konzepte entlang verschiedener Dimensionen (Ausweitung der Modellinhalte auf umweltrelevante Aspekte, strukturelle Verallgemeinerung) schrittweise einführen.

### 2.1 Der traditionelle „Vier-Stufen-Algorithmus“ (VSA)

Der VSA wird in der Fachliteratur in mehreren Varianten und mit nicht ganz einheitlicher Terminologie dargestellt. Gemeinsam ist eine Sequenz von vier Modellen (deshalb die Bezeichnung „Vier-Stufen-Algorithmus“), wobei jedes Modell mit Ausnahme des ersten die Ausgabedaten des Vorgängermodells als Eingabedaten aufnimmt (siehe Abbildung 2-1).

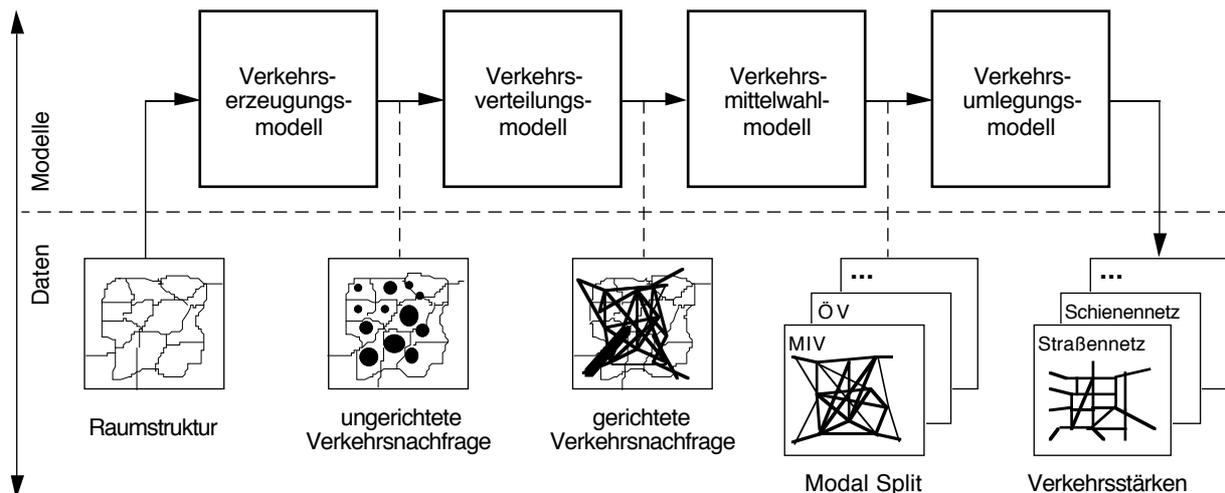
Eingaben in den VSA sind u.a. Daten zur Raum- und Siedlungsstruktur, die die verkehrsrelevanten Eigenschaften des Untersuchungsgebiets wiedergeben. Hier fließen geographische, demographische, ökonomische und sozio-ökonomische Zustandsdaten ein. Der Raum wird dabei diskretisiert, d.h. man betrachtet sogenannte *Zonen* oder *Verkehrszellen*, z.B. die Bezirke der amtlichen Statistik, oder auch nur markante Punkte, z.B. wichtige Verkehrsquellen, -ziele und -knoten. Diese Beschreibung des Untersuchungsgebietes wird auch als Modell der Raum-

---

<sup>1</sup> Dazu gehören die verbreiteten Programme VISEM und VISUM der ptv GmbH.

und Siedlungsstruktur bezeichnet (Wermuth 1994). Der eigentliche VSA umfaßt die folgende Modellkette:

- (1) **Verkehrserzeugung** (engl. generation): Das Verkehrserzeugungsmodell berechnet die *ungerichtete* Verkehrsnachfrage, d.h. den von jedem Raumelement ausgehenden Verkehrsbedarf. Beispielsweise kann man auf Basis der demographischen Daten einer Verkehrszelle abschätzen, mit welcher Häufigkeit aus der Verkehrszelle heraus Wege zu Arbeitsstätten, Ausbildungsstätten, Einkaufsgelegenheiten usw. angetreten werden. Entsprechend kann auf der Grundlage wirtschaftlicher Daten geschätzt werden, welche Güterströme von einer Verkehrszelle ausgehen und welches Aufkommen an Arbeitspendler- und Kundenverkehr von den dort niedergelassenen Unternehmen ausgeht.
- (2) **Verkehrsverteilung** (engl. distribution): Das Verkehrsverteilungsmodell berechnet die *gerichtete* Verkehrsnachfrage. Es wird der von jeder Verkehrsquelle ausgehende Verkehr auf passende Ziele verteilt. Dabei wird ein Teil des Verkehrs sein Ziel außerhalb des Untersuchungsraumes finden (Quellverkehr). Umgekehrt wird ein Teil der Ziele im Untersuchungsraum Verkehr von außerhalb liegenden Quellen anziehen (Zielverkehr). Daneben gibt es Binnenverkehr (Quelle und Ziel innerhalb) und Durchgangsverkehr (Quelle und Ziel außerhalb). Zielverkehr und Durchgangsverkehr müssen auf der Basis zusätzlicher Daten berücksichtigt werden, da sie nicht im Untersuchungsgebiet erzeugt werden. Das Ergebnis dieses Modells ist eine sogenannte *Verflechtungsmatrix* oder *Fahrtenmatrix*, häufig auch in Karten durch sogenannte *Verkehrsbedarfslinien* visualisiert, deren Dicke die Verkehrsnachfrage für eine Quell/Ziel-Beziehung veranschaulicht.
- (3) **Verkehrsmittelwahl** (auch Verkehrsteilung, engl. modal split): Das Verkehrsmittelwahlmodell berechnet die Aufteilung der gerichteten Verkehrsnachfrage auf die verschiedenen Verkehrsmodi (den *Modal Split*). In der Regel werden die drei Verkehrsmodi motorisierter Individualverkehr (MIV), öffentlicher Verkehr (ÖV) und nicht-motorisierter Verkehr (NMV), also Fußgänger- und Fahrradverkehr, unterschieden. Es sind aber auch andere Einteilungen im Gebrauch. Ergebnis dieses Modells ist eine nach Verkehrsmodi differenzierte Verflechtungsmatrix.
- (4) **Verkehrsumlegung** (engl. assignment): Das Verkehrsumlegungsmodell berechnet (in der Regel für verschiedene Verkehrsmodi unabhängig) die Verteilung der Verkehrslast auf das jeweilige Wegenetz. Das Modell berücksichtigt, daß sich die Geschwindigkeit auf einem Verkehrsweg mit der Belastung ändert. Es wird vorausgesetzt, daß die Verkehrsteilnehmer bei der Wahl ihrer Routen den sogenannten Verkehrswiderstand zu minimieren versuchen. Diese Größe wird unterschiedlich operationalisiert und z.T. auch mit subjektiven (z.B. nach Personengruppen unterschiedlich gewählten) Parametern versehen. Stets geht die Reisezeit in den Verkehrswiderstand ein, aber auch die monetären Kosten und nicht zuletzt qualitative Aspekte (z.B. Umsteigehäufigkeit im ÖPNV) können berücksichtigt werden. Ergebnis dieser letzten Stufe des VSA sind die Verkehrsstärken auf den einzelnen Verkehrswegen, bei Straßen z.B. in Kfz pro Zeiteinheit angegeben. Eventuell werden weitere Größen angegeben, z.B. mittlere Geschwindigkeiten auf den einzelnen Strecken.



**Abb. 2-1:** Daten und Modelle im „Vier-Stufen-Algorithmus“ der Verkehrsprognose

Die letzte Stufe des VSA, die Verkehrsumlegung, werden wir im folgenden mehrfach als Beispiel verwenden. Deshalb wollen wir hier auf diese Stufe näher eingehen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, daß jedes Umlegungsmodell – explizit oder implizit – mindestens zwei Submodelle enthält:

- ein Kapazitätsmodell (engl. capacity restraint model), das die Reaktion der Verkehrskapazitäten auf Belastungen berechnet, im Straßenverkehr z.B. das Absinken der Geschwindigkeit bei zunehmender Verkehrsstärke bis hin zum Stau,
- ein Routenwahlmodell (engl. route choice model), das die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer für bestimmte Routen von der Quelle zum Ziel simuliert und das sich auf eine Reihe von Verhaltensannahmen stützen muß.

Für beide Submodelle werden in der Literatur mehrere Ansätze diskutiert, die auf unterschiedlichen Annahmen beruhen. Viele Routenwahlmodelle setzen z.B. voraus, daß jeder Teilnehmer über die Lastverteilung im Netz für den Zeitraum seiner Fahrt vollständig informiert ist und eine rationale Wahl trifft, daß es ihm mithin gelingt, die Route mit dem geringsten Widerstand zu wählen. Der Umlegungsalgorithmus berechnet dann in der Regel einen Gleichgewichtszustand, in dem kein Teilnehmer mehr seine Situation verbessern kann, indem er eine andere Route wählt (Nutzergleichgewicht). Offensichtlich gehen eine Reihe von Annahmen in die Verkehrsumlegung ein, die nach der Verknüpfung von Umlegungsalgorithmus, Kapazitäts- und Routenwahlmodell zu einem Umlegungsmodell möglicherweise nicht mehr transparent sind. Ähnliches gilt für die anderen Stufen des VSA.

*Varianten des VSA* betreffen insbesondere Rückkopplungen zwischen den Modellen. Bei näherer Betrachtung wird klar, daß Rückkopplungen zwischen nahezu allen Stufen auftreten können, z.B. kann der Stau im Straßenverkehr, den ein Umlegungsmodell (4) berechnet, die Verkehrsmittelwahl (3), die Wahl der Ziele (2) oder langfristig die Wahl des Wohnortes oder die Anschaffung eines Pkw beeinflussen und sich damit auf die Eingabe für (1) auswirken. Der Modal Split (3) beeinflusst die wirtschaftliche Situation öffentlicher Verkehrsbetriebe und damit auch die Qualität des Angebots, was wiederum auf vorausgehende Stufen zurückwirken kann.

## 2.2 Erweiterung des VSA um Modelle der Umweltbelastung

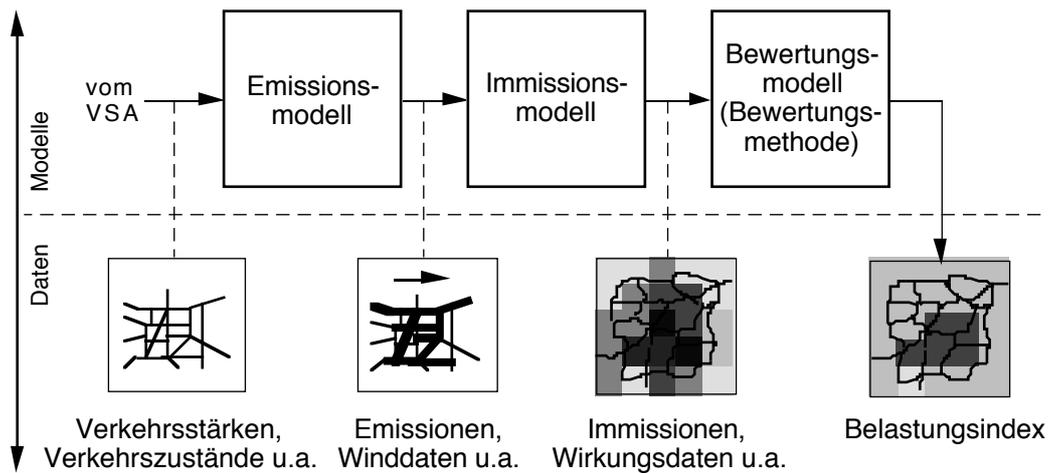
Bevor wir den VSA durch ein flexibleres, nicht mehr an die sequentielle Struktur gebundenes Konzept ersetzen, wollen wir die Modellkette des VSA um umweltbezogene Modelle erweitern (s. Abb. 2-2). Wir haben diese erweiterte Kette (jedoch ohne Bewertungsmodell) implementiert und praktisch eingesetzt, um Erfahrungen mit den Modellen zu sammeln.

Die Berechnung umweltrelevanter Größen wie Energieverbrauch, Schadstoff- oder Lärmbelastung setzt als letzte Stufe des VSA ein relativ differenziertes Umlegungsmodell voraus, das neben Verkehrsstärken auch die Verkehrszustände auf den Strecken (z.B. Stausituationen) und möglichst auch die Zusammensetzung der Verkehrsströme (z.B. nach Pkw und Lkw, weiter differenziert nach Gewichtsklassen, Energieträgern und Emissionsminderungstechnik) liefert.

Wir konzentrieren uns im folgenden exemplarisch auf die Emission und Immission von Luftschadstoffen. Unter *Emission* versteht man generell die Ausbringung von Stoffen oder Energieformen in die Umwelt. Die wichtigsten stofflichen Emissionen des Straßenverkehrs sind die toxischen Substanzen Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), flüchtige Kohlenwasserstoffe (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), Partikel (Staub, Ruß, teils schwermetallhaltig) und das nicht-toxische Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), dessen Anreicherung in der Atmosphäre den natürlichen Treibhauseffekt verstärkt. Unter *Immission* versteht man die Einwirkung der emittierten Stoffe oder Energieformen auf Schutzgüter (Mensch, Tier, Pflanze, Kulturgut). Maß für die Stärke stofflicher Immissionen ist die Konzentration (z.B. in µg/m<sup>3</sup>).

Die Numerierung der Modellstufen soll die Erweiterung des VSA, wie im vorausgegangenen Abschnitt dargestellt, andeuten:

- (5) **Emission:** Ein Emissionsmodell für Luftschadstoffe berechnet die Emissionsraten (angegeben als Massenströme, z.B. in g/h) für jeden Schadstoff, bezogen auf Fahrzeuge oder Streckenabschnitte. Eingabedaten für Emissionsmodelle sind Verkehrsstärken und weitere Attribute der Verkehrsströme (wie die mittlere Geschwindigkeit). Die wichtigsten Modellparameter sind Emissionsfaktoren (differenziert nach Verkehrsmitteln und Fahrzuständen).
- (6) **Immission:** Immissionsmodelle für Schadstoffe berechnen die Schadstoffkonzentrationen am Ort der Einwirkung, im Straßenverkehr z.B. für die Fußgänger oder die Anwohner der Straße. Einfachere Immissionsmodelle *klassifizieren* lediglich die Emissions- und Ausbreitungssituationen, anspruchsvollere *simulieren* dagegen den Ausbreitungsvorgang (numerische Ausbreitungsmodelle). Zur Vorhersage von Sekundäremissionen wie Ozon (O<sub>3</sub>) müssen auch chemische Reaktionen in der Atmosphäre simuliert werden.
- (7) **Bewertung:** Bewertungsmodelle sind notwendig, wenn qualitativ unterschiedliche Immissionen oder andere Formen der Umweltbelastung zu einer einzigen Größe aggregiert werden sollen, die das Ausmaß der Belastung insgesamt angibt. Eine solche künstliche Größe wird als *Belastungsindex* bezeichnet. In Bewertungsmodelle fließen Annahmen über Schadstoffwirkungen (z.B. Dosis/Wirkungs-Funktionen) und Bewertungen der Wirkungen ein. Verschiedene Bewertungsmodelle können zu qualitativ unterschiedlichen Ergebnissen führen, wie sich im Bereich der Ökobilanzen gezeigt hat (vgl. Walder et al. 1991, Hilty 1994).



**Abb. 2-2:** Exemplarische Erweiterung des VSA zur Berücksichtigung der Umweltbelastung

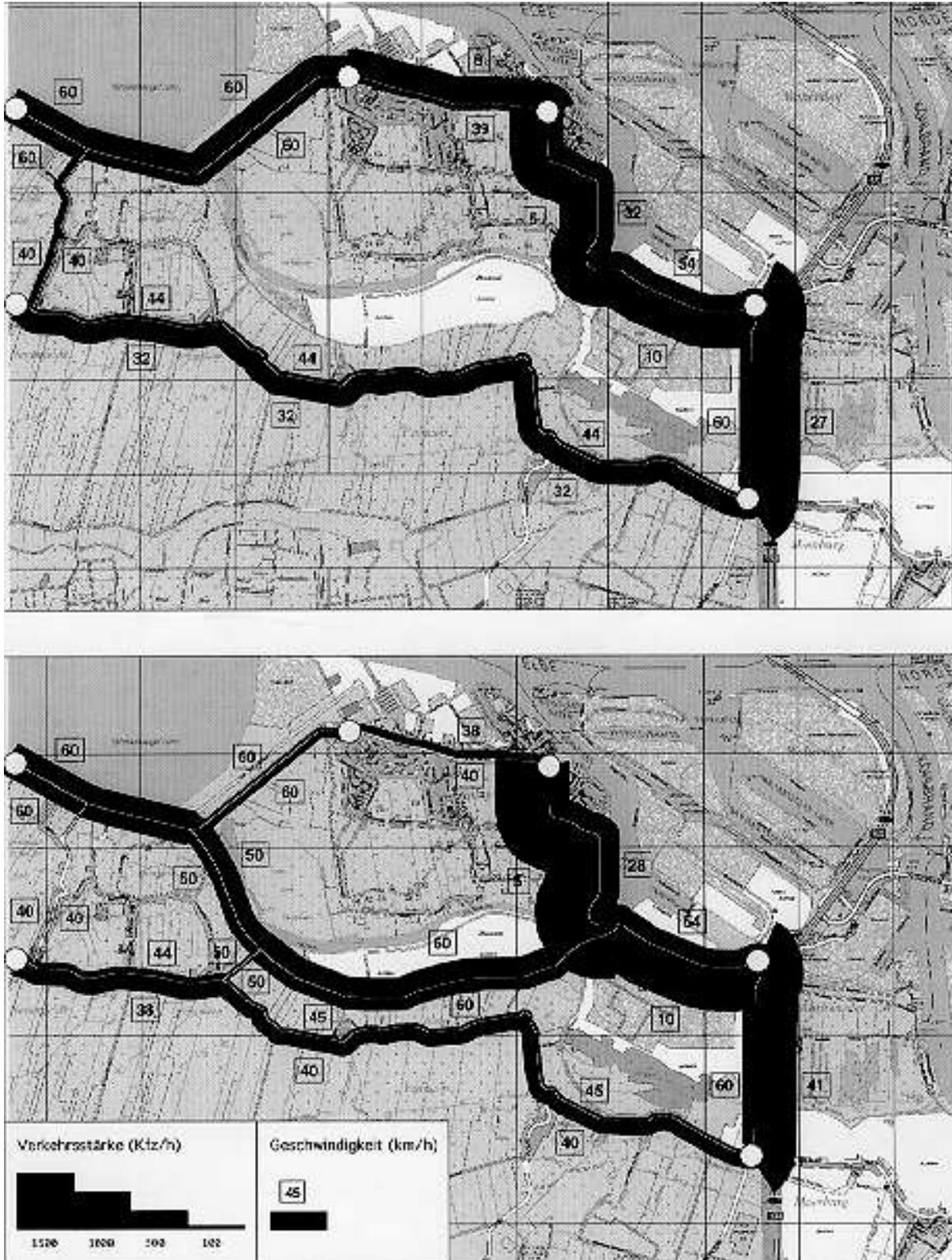
Bewertungsmodelle werden auch als *Bewertungsmethoden* bezeichnet. Wir werden im folgenden ausschließlich diese Bezeichnung verwenden, da es sich nicht um Modelle in unserem Sinne handelt (vgl. die Begriffsklärung auf S. 12).<sup>2</sup>

Wir haben die beschriebene Verknüpfung von verkehrs- und umweltbezogenen Modellen in verschiedenen Varianten exemplarisch in einer Fallstudie eingesetzt, um Erfahrungen mit der praktischen Anwendung der Modelle zu gewinnen. Die Abbildungen 2-3 bis 2-5 zeigen drei Paare von thematischen Karten, die die simulierten Verkehrsstärken sowie die daraus berechneten  $\text{NO}_x$ -Emissionen und -Immissionen im Hamburger Stadtteil Finkenwerder visualisieren; jeweils vor und nach dem Bau einer geplanten Umgehungsstraße. Gezeigt wird die Situation um 8:00 Uhr morgens an einem normalen Werktag. Für das Ausbreitungsmodell wurde ein homogenes Windfeld mit Westwind 4 m/s (Windstärke 1) angenommen.

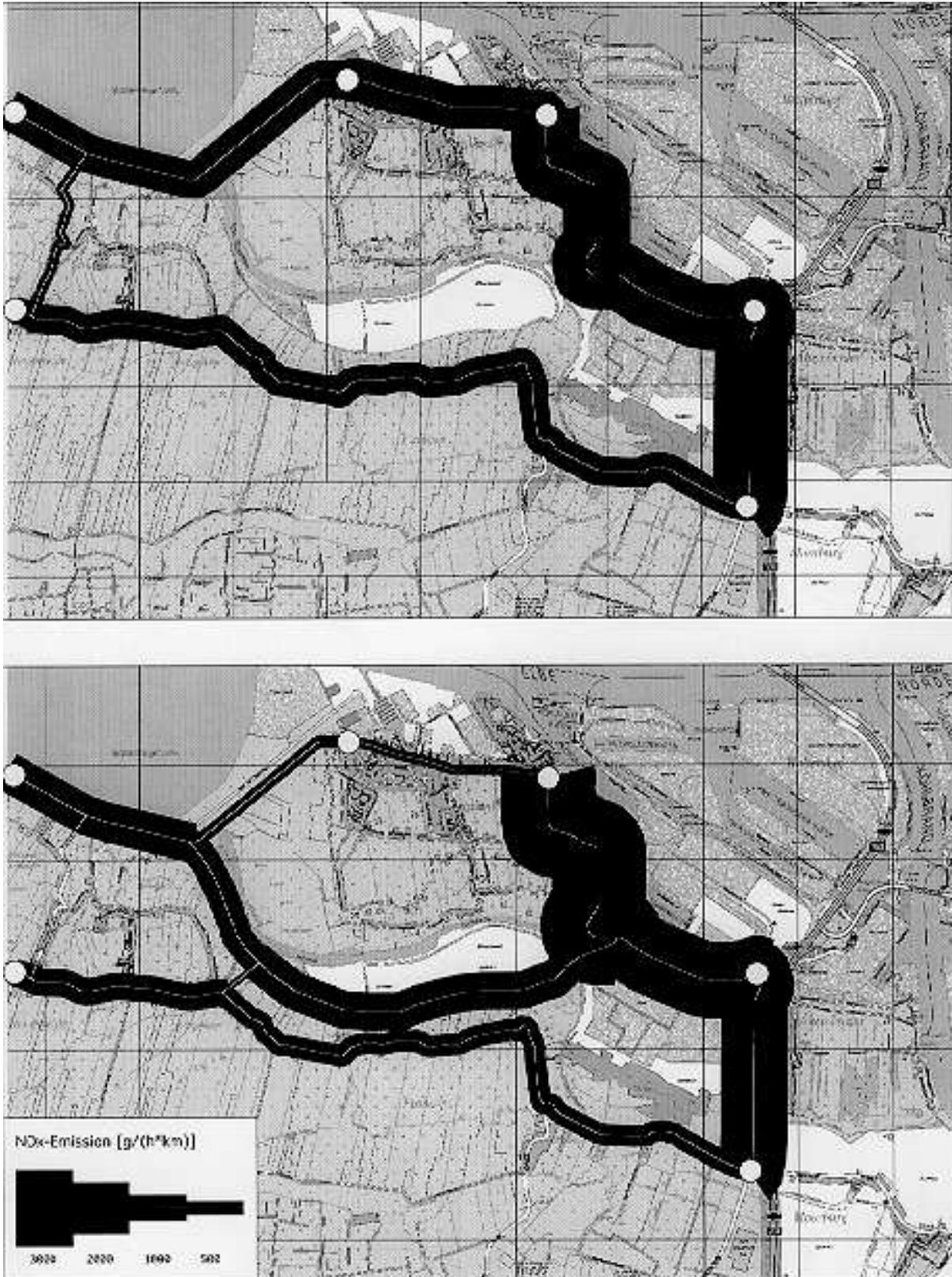
Die gezeigten Karten stellen eine willkürliche Auswahl der Ergebnisse dar, da jeweils für 24 Stunden, für vier Hauptszenarien und mit zwei Modellvarianten simuliert wurde, woraus sich 192 simulierte Verkehrssituationen ergeben. Neben Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) wurden ferner die flüchtigen Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) berücksichtigt. Für eine ausführlichere Dokumentation dieser Fallstudie siehe Meyer/Hilty 1996.

In den folgenden Abschnitten dieses 2. Kapitels erläutern wir das Modellierungskonzept, das der Architektur des MOBILE-Systems zugrundeliegt. Es unterscheidet sich von herkömmlichen Ansätzen der Verkehrssimulation hauptsächlich dadurch, daß das für eine bestimmte Fragestellung benötigte Modell nach dem „Baukastenprinzip“ jeweils neu aufgebaut wird.

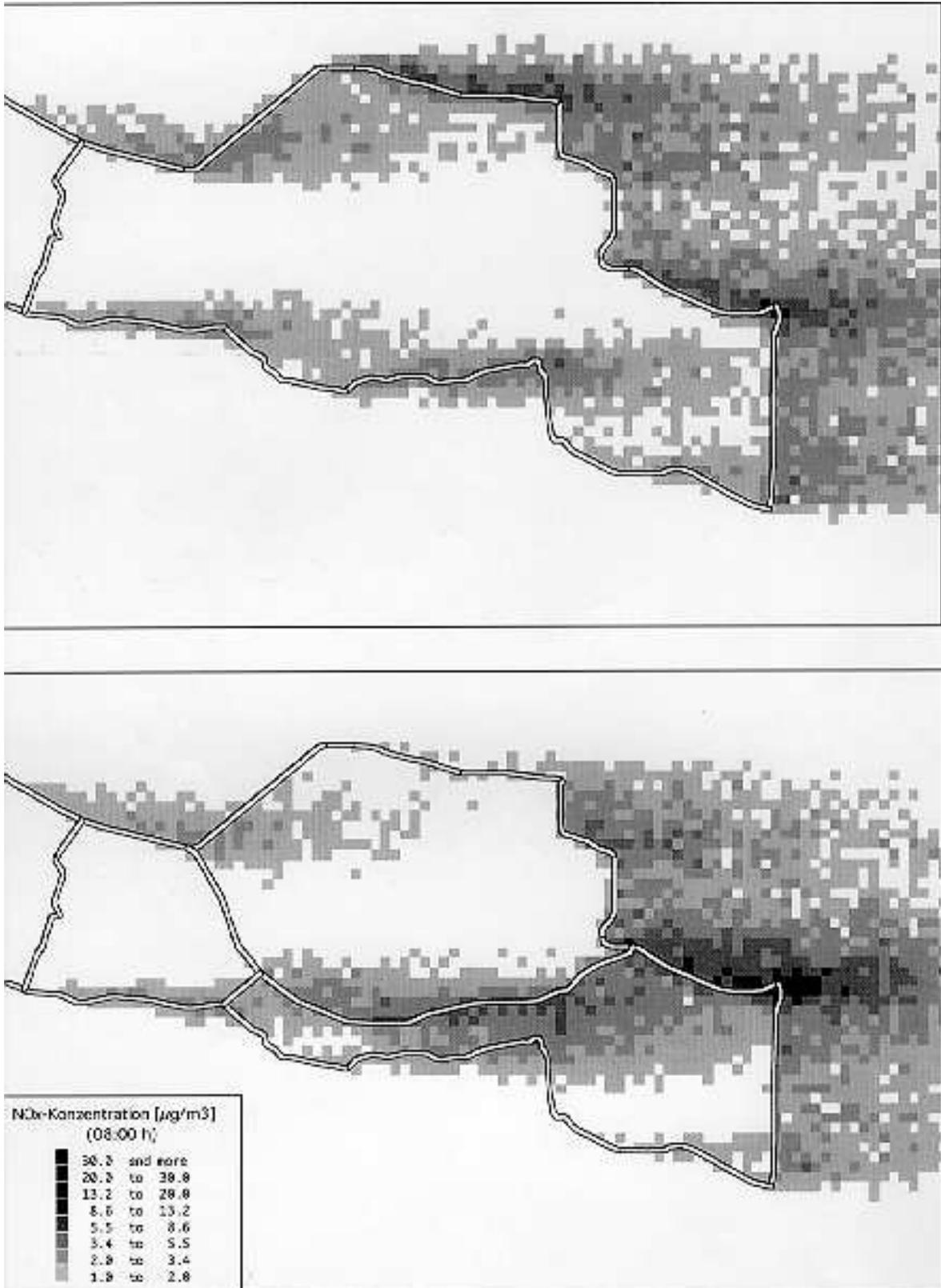
<sup>2</sup> Zur Diskussion von Bewertungsmodellen bzw. -methoden im Umweltbereich vgl. Walder et al. (1991) und mit Bezug zum Verkehr Hilty (1994).



**Abb. 2-3:** Mit einem Umlegungsmodell berechnete Verkehrsstärken und Durchschnittsgeschwindigkeiten des Straßenverkehrs im Raum Finkenwerder an einem normalen Werktag um 8.00 Uhr; Situation im Status quo (oben) und nach dem Bau einer Umgehungsstraße bei gleichzeitiger Sperrung des Ortes für den Durchgangsverkehr (unten). Die Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten sind nach Fahrtrichtungen getrennt angezeigt.



**Abb. 2-4:** Mit einem Emissionsmodell berechnete Stickoxid-Ausstoßraten zu den in Abb. 2-3 angegebenen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten. Der Lkw-Anteil wurde mit 5 Prozent, der Mix der Pkw-Typen und Emissionsminderungstechniken nach Bundesdurchschnitt angenommen. Die Emissionsraten beider Fahrtrichtungen wurden addiert.



**Abb. 2-5:** Mit einem Ausbreitungsmodell berechnete Stickoxid-Konzentrationen zu den in Abb. 2-4 angegebenen und für die davorliegende Zeit (ab 0:00 Uhr) berechneten Emissionen. Das Windfeld wurde mit Westwind und konstant 4 m/s angenommen. Andere NO<sub>x</sub>-Emittenten, Bebauung und Geländeform wurden nicht berücksichtigt. Aufgrund dieser Vereinfachungen ist eine quantitative Interpretation dieser Ergebnisse nicht angemessen.

## 2.3 Modellbildung nach dem Baukastenprinzip

Ein potentieller Anwender von Simulationsmodellen hat – und dies gilt für fast alle Anwendungsgebiete – meist nur die Wahl zwischen zwei Möglichkeiten:

- Er benutzt ein fertiges Modell, das im allgemeinen nicht für seine spezielle Problemstellung entwickelt wurde und auf (impliziten) Annahmen beruht, die er möglicherweise nicht teilt.
- Er entwickelt ein neues Modell mit relativ hohem Aufwand.

Ein Ansatz zur Auflösung dieses Dilemmas ist die Modellbildung nach dem *Baukastenprinzip*. Dieser Ansatz wurde schon Ende der siebziger Jahre zum Konzept des Modellbanksystems präzisiert und für den Bereich der sozio-ökonomischen Modellierung erstmals realisiert (vgl. Klösgen et al. 1983, mit Bezug zum Umweltbereich auch Hilty/Page 1986).

In einem *Modellbanksystem* sind die in einem Anwendungsbereich üblichen Modelle in Form elementarer Bausteine vorgegeben und können flexibel und mit geringem Aufwand zu komplexeren Modellen verknüpft werden. Auch die Erweiterung der Grundausstattung an elementaren Bausteinen ist vorgesehen, sollte aber selten erforderlich sein. Entscheidend ist die Möglichkeit zur Modellierung auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau, so daß Modelle auch ad hoc erstellt und ggf. ohne großen Verlust wieder verworfen werden können.

Wir erneuern das ursprüngliche Konzept des Modellbanksystems im Rahmen der Methodik der *objektorientierten Modellierung* und verwenden es als Grundlage des MOBILE-Ansatzes der Modellbildung (Näheres siehe Mügge/Hilty 1996). Mit dem objektorientierten Ansatz werden viele der ursprünglichen Ziele des Modellbank-Konzepts heute überhaupt erst realisierbar.

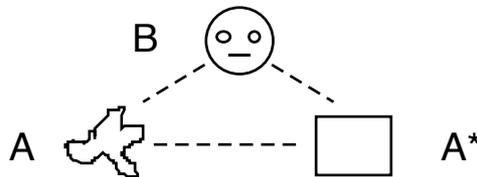
Modellierung nach dem Baukastenprinzip setzt voraus, daß für das jeweilige Anwendungsgebiet ein Grundvorrat an Modellbausteinen (atomaren Modellen) existiert, durch deren Kombination Modelle für einen möglichst großen Bereich von Problemstellungen erzeugt werden können (Prinzip der Orthogonalität). Ein Ziel des MOBILE-Projekts ist es, diesen Grundvorrat für das Anwendungsgebiet Verkehr/Logistik/Umwelt aufzubauen. Dies geschieht teilweise unter Verwendung vorhandener Modelle, die re-implementiert oder angepaßt werden, teilweise durch Neuentwicklung von Bausteinen.

Im einzelnen sind beim Aufbau der Modellbank die folgenden Aufgaben zu lösen:

- Vereinheitlichung der Modellschnittstellen (2.3.1)
- Atomisierung der Modelle, hierarchische Modellierung (2.3.2)
- Flexibilisierung des räumlichen und zeitlichen Aggregationsniveaus (2.3.3)
- Einbeziehung individuenbasierter Modelle und Akteursmodellierung (2.3.4)

### **Begriffsklärung: Modell**

Das Wort „Modell“ wird sehr uneinheitlich verwendet. Wir beziehen uns auf die folgende, sehr allgemeinen Definition von Marvin Minsky: „To an observer B, an object A\* is a model of an object A to the extent that B can use A\* to answer questions that interest him about A.“ (Minsky 1968, S. 426)



A heißt auch „Original“ von A\*. Das Original muß kein reales Objekt (Realsystem) sein; häufig existiert es zunächst nur als Vorstellung (fiktives, hypothetisches System), wobei das Modell zur Klärung von Fragen im Vorfeld seiner Realisierung dient.

#### **2.3.1 Vereinheitlichung der Modellschnittstellen**

Modellbildung beginnt immer mit der räumlichen, zeitlichen und thematischen Abgrenzung des zu modellierenden Systems (des Originals), d.h. mit der Festlegung der Systemgrenzen. In der Regel versucht man die Systemgrenze so zu ziehen, daß die Zahl der zu berücksichtigenden Interaktionen des Systems mit seinem Umfeld möglichst klein wird.

Der Anwender eines Modells findet die berücksichtigten Einflüsse des Systemumfeldes auf das System als exogene Modellgrößen (Inputvariablen) in der Modellschnittstelle vor. Zur Anwendung des Modells muß er diese Inputvariablen mit Daten versorgen.

Es ist meist schwierig, exogene Variablen nachträglich zu „endogenisieren“, d.h. die Systemgrenze weiter nach außen zu verlegen. Dies ist beispielsweise erforderlich, wenn man den VSA um die oben erwähnten Rückkopplungen erweitern möchte. Eingabedaten wie die wirtschaftlichen und demographischen Daten des Untersuchungsgebietes sollen z.B. abhängig gemacht werden von Ausgabedaten wie der Verkehrsbelastung oder Umweltbelastung. Die Realisierung ist deshalb schwierig, weil die Modellschnittstelle im allgemeinen schon bezüglich der Datenformate nicht für solche Kopplungen ausgelegt ist und weil die Steuerung eines so erweiterten Modells u.U. Probleme aufwirft.<sup>3</sup>

Der umgekehrte Fall, die nachträgliche „Exogenisierung“ einer endogenen Variablen, stößt auf noch größere Schwierigkeiten, weil damit in die Kausalstruktur des gegebenen Modells eingegriffen wird. Damit dieser Fall möglichst selten eintritt, geht man bei der Modellierung nach dem Baukastenprinzip von „kleinen“ Teilmodellen aus, die relativ viele exogene Variablen aufweisen. Ein Teil dieser Variablen wird dann durch Verknüpfung der Modelle endogenisiert, die anderen bleiben als exogene Variablen des Gesamtmodells übrig.

<sup>3</sup> In der Praxis werden diese Schwierigkeiten häufig dadurch „gelöst“, daß die vorhandene Modellkette manuell iteriert wird. Die Ausgabedateien des VSA werden von Hand mehrfach wieder in die Modellkette eingespeist.

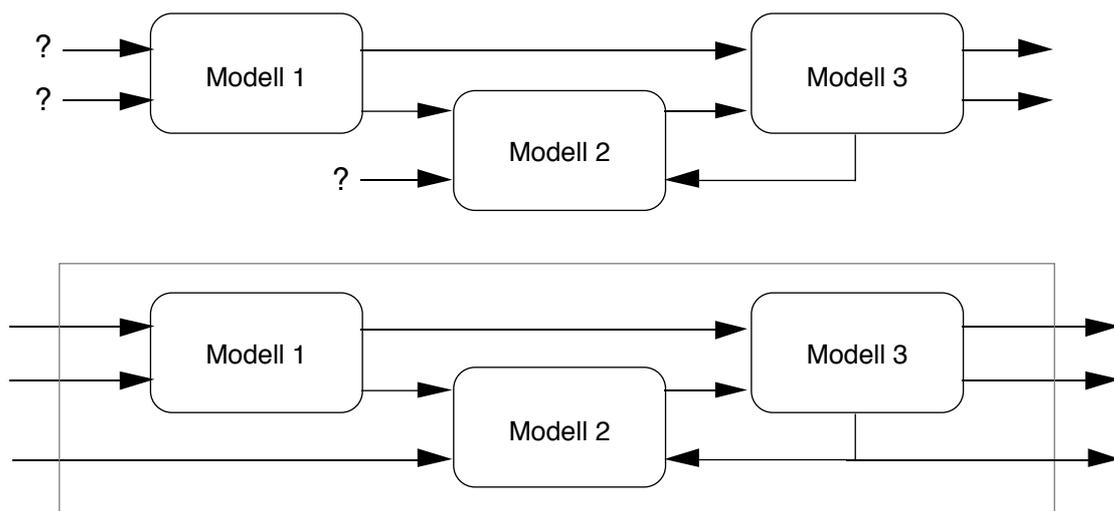
Eine flexible Modellierung setzt voraus, daß die Modelle einheitliche Schnittstellen aufweisen und daß ein genereller Mechanismus zur Ablaufsteuerung vorgesehen ist. Im MOBILE-Ansatz wird daher jede Kopplung von *Modellen mit Modellen* oder von *Modellen mit vorhandenen Daten* dadurch realisiert, daß ein *Nachrichtenaustausch* zwischen den beteiligten Komponenten ermöglicht wird. Dieses „message passing“-Konzept läßt insbesondere die *asynchrone* Verarbeitung der Modelle zu und bietet daher maximale Flexibilität bezüglich des Typs der verwendeten Teilmodelle. Ferner ist eine verteilte Ausführung des Gesamtmodells in einem heterogenen Netzwerk möglich, was unter anderem den Portierungsaufwand für bereits existierende Teilmodelle verringern kann.

Metadaten zu den Modellschnittstellen beschreiben in einheitlicher Form die Typen von Nachrichten, die ein Modell senden bzw. empfangen kann (Hilty/Mügge 1996).

### 2.3.2 Atomisierung der Modelle, hierarchische Modellierung

Das Baukastenprinzip ermöglicht nur dann eine flexible Modellierung, wenn die verfügbaren Teilmodelle (Bausteine) ausreichend „klein“ sind, um viele sinnvolle Kombinationen zu gestatten. Die Systemgrenzen für diese Modelle sollten also relativ eng gezogen sein, und die Schnittstellen sollten viele exogene Variablen vorsehen. Wir bezeichnen diese Teilmodelle der untersten Ebene als *atomare Modelle*.

Diese Modelle sind in der Regel nur als Teilmodelle eines umfassenderen Modells sinnvoll, d.h. sie werden als Bausteine für komplexere Modelle benutzt. Bei der Verknüpfung der Teilmodelle werden einige der exogenen Variablen zu endogenen Variablen des entstehenden Gesamtmodells. Die Inputvariablen, die unverknüpft bleiben, bilden die exogenen Variablen des Gesamtmodells. Dies ist in Abbildung 2-6 an einem abstrakten Beispiel veranschaulicht.



**Abb. 2-6:** Modellverknüpfung nach dem Baukastenprinzip. Die abgerundeten Rechtecke stehen für Instanzen von Modellklassen (Modellobjekte), die Verbindungen für Datenfluß (Nachrichtenaustausch). Unverbundene Inputvariablen der Komponenten werden zu Inputvariablen des Gesamtmodells; alle Outputvariablen von Komponenten, auch intern verknüpfte, sind potentielle Outputvariablen des Gesamtmodells.

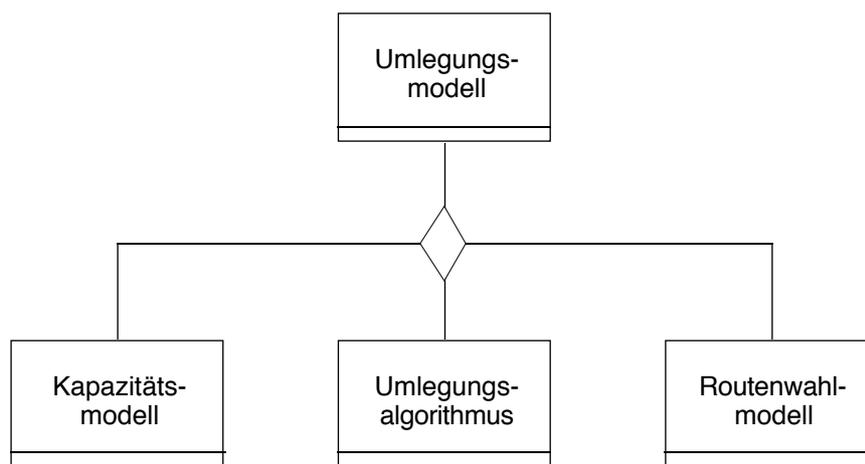
In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der optimalen Granularität der Modellbausteine. Wir wählen hierfür die *kleinsten noch für das Anwendungsgebiet spezifischen Einheiten*. Dies ist allerdings kein hartes Kriterium, da das Anwendungsgebiet „Verkehr und Umwelt“ keinen scharfen Grenzen aufweist. Welche Bausteine sich als nützlich erweisen, werden die weiteren geplanten Fallstudien zeigen.

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Teilmodelle des VSA sind, wie die meisten gängigen Modelle in diesem Anwendungsbereich, eindeutig zu „groß“, um als atomare Modelle in die Modellbank aufgenommen werden. Es ist daher erforderlich, sie in sinnvolle konzeptuelle Einheiten zu zerlegen.

Als Beispiel für die Zerlegung eines gegebenen Modells soll wiederum die Verkehrsumlegung dienen. Wie in Abschnitt 2.1 bereits erwähnt, sind in ein Umlegungsmodell mindestens zwei weitere Modelle verschachtelt: ein Kapazitätsmodell und ein Routenwahlmodell.

Zerlegt man das Umlegungsmodell in den eigentlichen Umlegungsalgorithmus und die zwei Teilmodelle, so müssen sie (ähnlich wie in Abb. 2-6) zunächst auf der Ebene der Modellinstanzen verknüpft werden. Das objektorientierte Modellbanksystem erlaubt dann, eine Modellklasse zu erzeugen, die eben diese Verknüpfungsstruktur repräsentiert. Dies ist die Klasse „Umlegungsmodell“ in Abb. 2-7.

Dadurch ist es später leicht möglich, für jede der drei Modellkomponenten – unabhängig voneinander – Alternativen zu wählen. Der Benutzer des Modellbanksystems kann sich bei jeder Komponente separat für die Variante entscheiden, welche ihm im Rahmen seiner Problemstellung angemessen erscheint. (Dies wäre gerade in diesem Fall sinnvoll, da in der Literatur mehrere Varianten aller genannten Teilmodelle diskutiert werden; vgl. z.B. Ortuzar/Willumsen 1994 und Wermuth 1994) Der Benutzer wird außerdem für die Frage sensibilisiert, wie sich die möglichen Modellkompositionen auf die Ergebnisse auswirken, d.h. wie sensitiv das Gesamtmodell für Varianten von Teilmodellen ist.



**Abb. 2-7:** Beispiel für eine Modellhierarchie: Das Umlegungsmodell besteht aus den drei Komponenten Umlegungsalgorithmus, Routenwahlmodell und Kapazitätsmodell. Die Rechtecke mit doppelter Unterkante stehen für Modellklassen, der Rhombus zeigt die Komponentenhierarchie an. Dieses Beispiel wird hinsichtlich der Verknüpfung der Komponenten in Mügge/Meyer (1996) näher ausgeführt.

Modellklassen, die auf diesem Wege entstanden sind, werden in der Modellbank abgelegt und stehen wiederum als Bausteine für Modelle zur Verfügung. Dadurch lassen sich Modelle mit einer beliebigen Zahl von Hierarchieebenen realisieren.

### 2.3.3 Flexibilisierung des räumlichen und zeitlichen Aggregationsniveaus

Das räumliche Aggregationsniveau der Modelle, die für Anwendungen im Bereich Verkehr und Umwelt relevant sind, variiert mit der Problemstellung sehr stark. Das obere Ende der Aggregationskala bilden Modelle, die auf Basis einer Fortschreibung der Fahrzeugbestände, mittlerer Fahrleistungen, Emissionsfaktoren und anderer Daten die Schadstoffemissionen des (Straßen-)Verkehrs in der Summe abschätzen (Gesamtemissionsmodelle, vgl. Freese et al. 1994). Ein Modell zur Personenverkehrsentwicklung in Ballungsräumen (Hilty 1994) berechnet Energieverbrauch und Flächenbeanspruchung pauschal, bezogen auf das gesamte betrachtete Gebiet. Die in der Verkehrsplanung üblichen VSA-Modelle zerteilen das Untersuchungsgebiet in der Regel in Verkehrszellen auf der Ebene statistischer Bezirke und berechnen die Anzahl von Fahrten (makroskopische Verkehrsflußmodelle). Das untere Ende des Spektrums bilden schließlich Modelle, die individuelle Fahrzeuge auf einem Verkehrsweg abbilden (mikroskopische Verkehrsflußmodelle). Dieses niedrige Aggregationsniveau kann notwendig sein, wenn z.B. die Auswirkungen verkehrsbeeinflussender Maßnahmen im Detail zu untersuchen sind. Entsprechend variiert auch das zeitliche Aggregationsniveau. Das Spektrum reicht hier vom Jahres- bis in den Sekundenbereich.

Unser Modellierungsansatz ist offen bezüglich des räumlichen oder zeitlichen Aggregationsniveaus. Durch die Integration eines GIS kann zunächst die statische Modellierung des Raumes in beliebigem Maßstab erfolgen. Dynamische Modelle, die mit dem GIS gekoppelt werden, stehen exemplarisch bereits für verschiedene Aggregationsebenen zur Verfügung.

Wesentlich für die Modellierungsflexibilität ist die Möglichkeit der *Kopplung von Modellen mit unterschiedlichem Aggregationsniveau*. Beispielsweise erfordert die Modellierung von Logistikkonzepten für Stadtkuriere<sup>4</sup> eine detaillierte Darstellung der Verkehrswege und jedes einzelnen Kurierfahrzeugs (Pkw oder Fahrrad), also ein mikroskopisches Modell. Es wäre aber nahezu unmöglich, auch den übrigen Straßenverkehr – der die Kuriere wesentlich beeinflusst – ebenso detailliert zu modellieren. Man wird hier ein aggregierteres Modell verwenden und es so mit dem mikroskopischen Modell verknüpfen müssen, daß dieses vom ersten kausal abhängig ist, während man die umgekehrte Beeinflussungsrichtung vernachlässigt.

Dieses Konzept wurde bereits für einen anderen Anwendungsfall (Modell zu JIT<sup>5</sup>-Strategien) erprobt, wo zwischen „Vordergrundverkehr“ und „Hintergrundverkehr“ unterschieden wurde (Hilty/Martinssen 1993, Hilty et al. 1994). Ähnliche Fragestellungen treten im übrigen auch bei der Modellierung des Datenverkehrs in Rechnernetzen auf, beispielsweise wenn Übertragungszeiten für Filetransfers geschätzt werden sollen, die von anderen Verkehrsarten überlagert werden (Feix/Wolfinger 1992).

---

<sup>4</sup> Zu diesem Thema führen wir eine Fallstudie in Zusammenarbeit mit dem Bundesverband der Kurier-Express-Paketdienste e.V. (BdKEP) durch. Ergebnisse werden voraussichtlich im Herbst 1996 veröffentlicht.

<sup>5</sup> Just in time

### 2.3.4 Einbeziehung individuenbasierter Modelle und Akteursmodellierung

Mit den heute im Workstation-Bereich üblichen Rechenleistungen und Hauptspeicherkapazitäten ist es möglich, zeitdiskrete Modelle einzusetzen, die eine große Anzahl ( $10^4$ - $10^5$ ) identifizierbarer Objekte mit individuellen Merkmalen simulieren (individuenbasierte Modelle). Dabei werden die Verhaltensmerkmale der Individuen in der Regel nicht deterministisch vorgegeben, sondern mit Zufallszahlenströmen erzeugt, die gegebenen Verteilungen folgen.

In der mikroskopischen Verkehrsflußsimulation werden individuenbasierte Modelle beispielsweise zur Simulation von Fahrzeugfolgen eingesetzt, wobei sich das Verhalten einer Fahrzeugkolonne aus dem individuellen Verhalten der einzelnen Fahrer ergibt. Diese können sich z.B. in Verhaltensmerkmalen wie Risikobereitschaft, Reaktionsschnelligkeit, Beachtung von Verkehrsregeln oder Verkehrsinformationen unterscheiden. Die Fahrzeuge können nach Merkmalen wie Typ, Alter, Emissionsminderungstechnik usw. unterschieden werden.

Der gesamte Verkehr von Albuquerque (Fußgänger, Radfahrer, Pkw, Lkw, Züge) wurde im Rahmen des amerikanischen TRANSIMS<sup>6</sup>-Projekts mit einem individuenbasierten Modell simuliert. Es dient nach Auskunft der Entwickler u.a. dazu, den sogenannten Kaltstarteinfluß bei Pkw mit Katalysator differenziert zu untersuchen.

Relevant sind individuenbasierte Modelle auch für den Bereich der Verkehrserzeugung. Hier kann das Mobilitätsverhalten von Privathaushalten (Wahl von Aktivitäten, Zielen, Verkehrsmitteln, Zeitpunkten und Routen) oder die Logistik eines Unternehmens detaillierter simuliert werden als mit Modellen, die sogenannte verhaltenshomogene Gruppen bzw. ganze Wirtschaftsbranchen pauschal behandeln. Auch dort, wo der Einsatz eines individuenbasierten Modells übertrieben detailliert erscheint, kann es zunächst hilfreich sein, um die Zulässigkeit der Abstraktionen zu prüfen, die mit einem höher aggregierten Modell einhergehen.

In der Systemtheorie ist heute die Modellierung von *Akteuren*, d.h. von Individuen einschließlich ihres Entscheidungsverhaltens, ein aktuelles Forschungsthema. Individuenbasierte Simulationsmodelle ermöglichen hier die Exploration von systemtheoretischen Erklärungsansätzen in einer Weise, die gerade für den Bereich Verkehr und Umwelt von großer Bedeutung ist. Insbesondere können die der traditionellen Verkehrsplanung zugrundeliegenden Annahmen über vollständige Information und rationales Entscheidungsverhalten der Teilnehmer durch empirisch besser gestützte (aber aufwendiger zu modellierende) Annahmen ersetzt werden. Die Akteursmodellierung ermöglicht auch eine bessere Abbildung von Verkehrsursachen und damit von Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Transportation Analysis Simulation Systems

<sup>7</sup> Zu den Zielen des MOBILE-Projekts gehört es, neben höher aggregierten Modellen auch leistungsfähige individuenbasierte Modelle zur Verfügung zu stellen, um so das bisherige Modellspektrum zu erweitern. Die individuenbasierten Modelle entwickeln wir in Zusammenarbeit mit der Gruppe für Systemanalyse am Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie.

## 2.4 Flexibilisierung der Modellexperimente

Simulation ist das *Experimentieren mit Modellen* (vgl. Page 1991). Es lohnt sich daher, kurz auf den Begriff des Experiments einzugehen. Unabhängig von der unterschiedlichen Begriffsbildung und Methodik in den Wissenschaften wird ein Experiment stets von der reinen Beobachtung oder Messung unterschieden. Die „kontrollierte Variation der Bedingungskonstellationen“ ist ein Kennzeichen jedes wissenschaftlichen Experiments. Ein solches „verbindet [...] die systematische Beobachtung von Systemen [...] mit der möglichst weitgehenden Kontrolle der Bedingungen, unter denen die Systeme beobachtet werden“ (Hummell 1980, S. 210f).

Die *Simulation* ist nun gerade in den Fällen nützlich, in denen es zu aufwendig ist, zu lange dauert oder sich aus ethischen Gründen verbietet, ein Realsystem unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen (also mit dem Realsystem zu experimentieren).

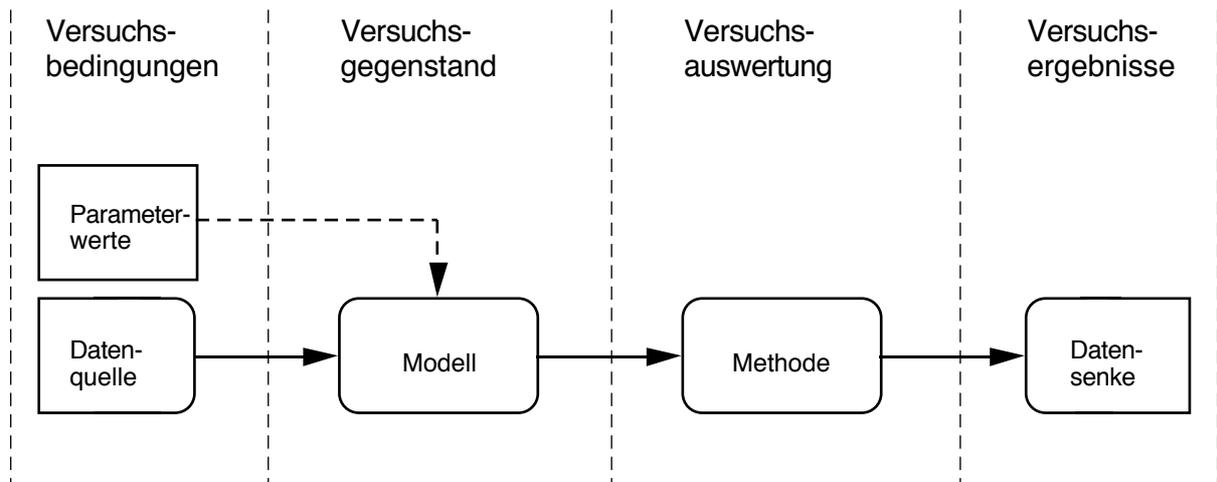
Anstelle des Realsystems wird dann ein *Modell* als Versuchsgegenstand benutzt. Solche *Modellexperimente* (auch *Simulationsexperimente* genannt) lassen sich in zwei grundlegend verschiedene Klassen einteilen:

- (1) Experimente, die voraussetzen, daß das Modell im Rahmen der jeweiligen Problemstellung gültig (valide) ist, und
- (2) Experimente, die dazu dienen, die Gültigkeit des Modells zu überprüfen (Validierungsexperimente).

Wir unterscheiden ferner bei Modellexperimenten (wie bei Realexperimenten) Versuchsbedingungen, Versuchsgegenstand und Versuchsauswertung. Den Versuchsgegenstand bildet ein Modell oder eine Menge von Modellen. Wie bei Realexperimenten gibt es auch bei Modellexperimenten einen Versuchsaufbau oder Versuchsplan (engl. experimental design), der geeignet sein muß, Effekte zu demonstrieren, Größen zu messen, Hypothesen zu gewinnen oder Hypothesen zu überprüfen. Diese verschiedenen Zielsetzungen eines Experiments stellen unterschiedliche Anforderungen an den Versuchsaufbau.

Der in der Simulationspraxis häufig anzutreffende elementare Aufbau von Modellexperimenten (siehe Abb. 2-8) ist ein Spezialfall, der für viele relevante Fälle nicht ausreichend ist.

Komplexere Modellexperimente, bei denen ein Modell verschiedenen, systematisch variierten Versuchsbedingungen unterworfen wird oder an denen mehrere Modelle beteiligt sind, können zwar grundsätzlich durch Wiederholung dieses Schemas realisiert werden, doch ist dann der Benutzer für den korrekten Ablauf und die Zusammenführung und Auswertung der Einzelergebnisse selbst verantwortlich. Der eigentlich komplexe Versuchsaufbau ist nur durch die Vorgehensweise des Benutzers realisiert und im nachhinein oft nur noch schwer nachvollziehbar. Trotz Verwendung eines Rechensystems hängt die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit des Experiments von der manuellen Dokumentation der Einzelversuche ab. Dies ist nicht nur eine unnötig aufwendige, sondern auch fehleranfällige Vorgehensweise.



**Abb. 2-8:** Das elementare Modellexperiment. Die durchgezogenen Pfeile zeigen den Datenfluß während des Experiments. Der gestrichelte Pfeil zeigt eine Verbindung, die nur bei Initialisierung des Experiments besteht: Modellparameter sind im Simulationszeitraum per definitionem konstant, während Inputvariablen im allgemeinen zeitabhängige Werte (Zeitreihen) erwarten. Instanzen zur Abgabe bzw. Aufnahme von Zeitreihen bezeichnen wir als Datenquellen bzw. -senken. Zum Begriff der Methode in diesem Kontext siehe auch die Begriffsklärung auf S. 19.

Aus diesem Grund sieht der MOBILE-Ansatz vor, daß der Benutzer den Versuchsaufbau der geplanten Modellexperimente *explizit* spezifiziert. Wir haben hierfür einen sehr allgemeinen Formalismus gewählt, indem wir jedes Modellexperiment als Datenflußgraphen auffassen. Die Knoten dieses Graphen sind Datenquellen, Modelle, Methoden zur Datentransformation (insbesondere Auswertungsmethoden) und Datensenken. Die Datensenken dienen zur Aufzeichnung von Ergebnissen.

In Verbindung mit dem Konzept der objektorientierten Modellierung werden die „Modellknoten“ im Datenflußgraphen als Instanzen von Modellklassen betrachtet (siehe dazu Abb. 2-9, Erläuterung folgt im nächsten Abschnitt). Genauso wird auch mit den Methoden verfahren, wobei Methodenklassen in Abb. 2-9 nicht dargestellt sind. Zum Begriff der Methode in diesem Kontext siehe die Begriffsklärung auf der folgenden Seite.

Als Datenflußgraphen spezifizierte Experimente können als neue Experimentklassen im System abgelegt werden. Dies sichert die Reproduzierbarkeit und systematische Dokumentation der Modellexperimente und erlaubt außerdem die Verwendung von Experimenten als Bausteine komplexerer Experimente.

Die graphischen Experimentspezifikationen werden zunächst in sogenannte Skripts umgesetzt, die dann von der Simulationssteuerung abgearbeitet werden. Die hierfür entwickelte MOBILE-Skript-Sprache (MSL) ist an anderer Stelle beschrieben (Mügge/Hilty 1996, Mügge/Meyer 1996).

### **Begriffsklärung: Daten – Modelle – Methoden – Experimente**

Im Bereich der Modellbildung und Simulation wurde im Zusammenhang mit Modellbanksystemen die Dreiteilung Daten/Methoden/Modelle eingeführt (vgl. z.B. Klösigen et al. 1983). Sie wurde später aufgrund der Forderung nach *Trennung von Modellen und Experimenten* in Simulationssystemen um Experimente erweitert. Moderne Werkzeuge für die Modellbildung und Simulation verwalten somit vier Typen von Objekten: Daten, Methoden, Modelle und Experimente (vgl. z.B. Grützner et al. 1995).

Der dabei angesprochene Methodenbegriff ist von dem der objektorientierten Modellierung und Programmierung verschieden, was einige terminologische Probleme aufwirft. Eine Methode im Rahmen der Modellbildung und Simulation (Methode<sub>MS</sub>) kann z.B. ein statistisches Verfahren zur Auswertung von Simulationsergebnissen sein, das einen inneren Zustand besitzt. Methoden mit Zuständen werden insbesondere dann benötigt, wenn die Methoden als Knoten in Datenflußgraphen eingesetzt werden, die Experimente repräsentieren. Solche Methoden müssen u.U. Werte kumulieren können.

Im Gegensatz dazu ist eine Methode in der objektorientierten Modellierung bzw. Programmierung (Methode<sub>OO</sub>) eine Operation, die von einem Objekt ausgeführt wird.

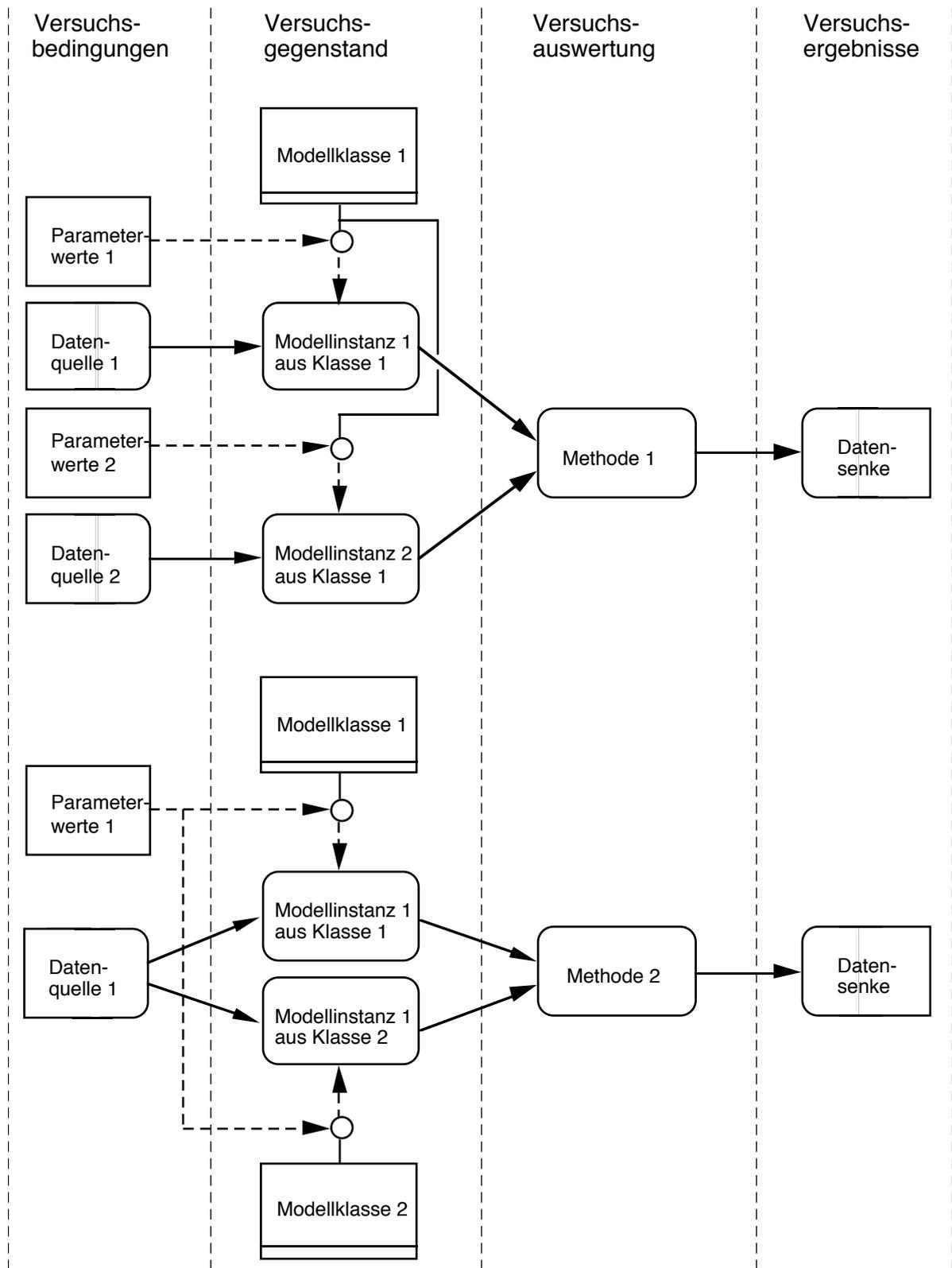
Eine Methode<sub>MS</sub> ist im Rahmen der Objektorientierung als Objekt aufzufassen. Es gibt Klassen und Instanzen von Methoden<sub>MS</sub>, wie es Klassen und Instanzen von Modellen und Experimenten gibt. Instanzen von Methoden<sub>MS</sub> verfügen, wie alle Instanzen, über Methoden<sub>OO</sub>.

#### **2.4.1 Szenarienvergleich**

Ein häufig praktiziertes Modellexperiment, für das der in Abb. 2-8 gezeigte elementare Versuchsaufbau bereits nicht mehr ausreicht, ist die Simulation verschiedener Szenarien und der systematische Vergleich der Ergebnisse. Beispielsweise hat die in Abschnitt 2.2 erwähnte Fallstudie zur Umgehungsstraße für Finkenwerder diese Grundstruktur. Wenn zwei Szenarien simuliert werden, läßt sich der Versuchsaufbau wie in Abb. 2-9 (oben) darstellen. Ziel der Studie sei in diesem Fall die Prüfung der Hypothese „Der Bau der geplanten Umgehungsstraße führt zu einer Verkehrsentlastung für Finkenwerder“. Hierfür werden zwei Instanzen der gleichen Modellklasse unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen, d.h. mit teilweise unterschiedlichen Eingabedaten, ausgeführt.

Ein Teil dieser Daten wird nur zur *Instantiierungszeit* des Modells benötigt, da sie sich im Simulationszeitraum nicht ändern. Solche Daten sind Werte für *Modellparameter*. Im erwähnten Beispiel ist dies die Topologie des Verkehrsnetzes, die im ersten Szenario ohne und im zweiten Szenario mit der Umgehungsstraße übergeben wird. Die einmalige Übergabe der Daten ist durch gestrichelte Pfeile symbolisiert.

Ein anderer Teil dieser Daten wird zur *Laufzeit* des Modells benötigt. Solche Daten sind Werte für *Eingabevariablen*, d.h. für exogene Modellgrößen, die im Simulationszeitraum potentiell veränderlich sind. Im allgemeinen handelt es sich dabei um Zeitreihen. Im erwähnten Beispiel wird die Sperrung von Finkenwerder für den Durchgangsverkehr auf diese Weise realisiert.



**Abb. 2-9:** Szenarienvergleich (oben) und Vergleich konkurrierender Modelle (unten) als einfachste Experimente mit mehreren Modellinstanzen. Durchgezogene Pfeile bilden zusammen mit den Knoten den Datenflußgraphen. Zusätzlich sind mit gestrichelten Pfeilen Verbindungen angezeigt, die nur bei Initialisierung des Experiments eine Rolle spielen. Das betrifft die Instantiierung von Modellen und Methoden und die Bereitstellung der dabei benötigten Daten. Kleine Kreise stehen für „Instantiierer“; sie sind mit der Klasse verbunden, aus der sie instantiieren.

Alle Streckenrichtungen und Knoten haben im Umlegungsmodell ein boolesches Attribut „gesperrt“. Grundsätzlich können mit diesem Umlegungsmodell auch Experimente mit temporären Sperrungen, die etwa unfallbedingt oder regelmäßig zu bestimmten Tageszeiten vorkommen, durchgeführt werden. Der während des Experiments stattfindende Datenfluß ist mit durchgezogenen Pfeilen angezeigt.

Die Ergebnisse beider Szenarien werden in einer Auswertungsmethode zusammengeführt, die geeignet sein muß, den Hypothesentest durchzuführen.

#### **2.4.2 Experimente mit konkurrierenden Modellen**

Obwohl es in fast allen Anwendungsgebieten der Simulation verschiedene Modelle gibt, die zur Untersuchung des gleichen Realsystems herangezogen werden können, werden diese selten systematisch verglichen. Solche *konkurrierenden Modelle* können im einfachsten Fall durch einen Versuchsaufbau gemeinsam untersucht werden, wie er in Abb. 2-9 (unten) gezeigt ist.

Experimente mit konkurrierenden Modellen sind z.B. dann nützlich, wenn die Modelle ein unterschiedliches Aggregationsniveau aufweisen (vgl. Abschnitt 2.3.3) und geprüft werden soll, ob die mit dem höher aggregierten Modell verbundenen Abstraktionen in der vorliegenden Problemstellung zulässig sind. Wenn sich dies bestätigt, kann danach mit dem höher aggregierten Modell weitergerechnet werden, was in der Regel Effizienzvorteile bietet.

Die Verwendung konkurrierender Modelle ist aber auch dann nützlich, wenn der Ausgang eines gegebenen Experiments von der Wahl des Modells oder eines Teilmodells abhängig ist. Dann wird deutlich, welche Modellannahmen geprüft und besser abgesichert werden müssen, um zu validen Aussagen zu gelangen.

Komplexere Modellexperimente können nicht mehr auf einer Ebene als „flache“ Datenflußgraphen realisiert werden. Beispielsweise liegt es nahe, den Szenarienvergleich in Abb. 2-9 (oben) mit konkurrierenden Umlegungsmodellen durchzuführen. Hierfür muß aus dem Szenarienvergleich eine Experimentklasse gewonnen werden, bei deren Instantiierung das zu verwendende Modell spezifiziert wird.

Durch Verwendung von Experimentklassen können höhere Modellexperimente aufgebaut werden, also Experimente, in deren Rahmen andere Experimente mehrfach instantiiert und ausgeführt werden. Für die Diskussion höherer Experimente und ihrer Beschreibung in MSL verweisen wir auf andere Publikationen (Mügge/Hilty 1996, Mügge/Meyer 1996).

### 3 Architektur des MOBILE-Systems

Das MOBILE-System ist für zwei Gruppen von Benutzern konzipiert:

- Modellanwender, z.B. Planer, Gutachter und andere Experten auf dem Gebiet der Verkehrsplanung, der Logistik oder Umweltforschung, die mit Hilfe des Systems Szenarien entwerfen, simulieren und auswerten wollen,
- Modellentwickler, z.B. Informatiker mit fundierten Kenntnissen im Anwendungsgebiet oder interdisziplinär zusammengesetzte Forschungsgruppen, die neue Modellbausteine in das System einbringen, indem sie diese portieren oder neu konzipieren und implementieren.

Der Modellanwender kann auf einer hohen Ebene ebenfalls Modelle erstellen, indem er vorhandene Bausteine verknüpft. Dies geschieht durch *Auswahl* von Modellklassen aus dem objektorientierten Modellbanksystem, *Instantiierung* der Modellklassen und *Verknüpfung* (Komposition) der Instanzen. Die so erstellten komplexen Modellinstanzen können zu Klassen generalisiert und wiederum in der Modellbank abgelegt werden. Auf ganz ähnliche Weise wie komplexe Modelle werden auch die Modellexperimente spezifiziert.

Beide Benutzertypen können das System nur dann sinnvoll anwenden, wenn sie Kenntnisse sowohl der Modellierungsprinzipien als auch der Möglichkeiten und Grenzen der Modellbildung in ihrem Anwendungsgebiet haben. Das System kann und soll dem Benutzer keine fachinhaltliche Auseinandersetzung mit der Problemstellung ersparen. Jedoch soll es ihn möglichst weitgehend von Problemen entlasten, die nicht in der Natur der inhaltlichen Aufgabenstellung liegen.

Für die beiden Benutzergruppen sind wegen der unterschiedlichen Art der Aufgaben verschiedene Benutzungsschnittstellen vorgesehen (siehe Abb. 3-1). Es liegt nahe, daß eine Person auch beide Benutzerrollen einnehmen kann und somit über beide Schnittstellen mit dem System interagiert. Während der Systementwicklung im MOBILE-Projekt ist dies sogar unvermeidbar, da wir im Rahmen von Fallstudien Modellbausteine entwickeln und selbst praktisch anwenden. Diese zur Projektlaufzeit entwickelten Bausteine bilden die Grundausstattung des Systems. Danach bleibt das System offen für Erweiterungen, die in späteren Anwendungen notwendig werden.

Die beiden Schnittstellen vermitteln verschiedene Sichten der Funktionalität des Systems, d.h. jede Schnittstelle ermöglicht die Nutzung einer anderen Teilmenge der Funktionen und bietet jeweils andere, dem Benutzer und seinen Aufgaben angemessene Formen der Interaktion:

- Dem Modellanwender präsentiert sich das System als Geographisches Informationssystem (GIS), das um Modellbank- und Simulationsfunktionen erweitert ist (dynamisches GIS).
- Der Modellentwickler sieht das System im wesentlichen als objektorientiertes Modellierungssystem, das insbesondere die Implementation neuer Modellbausteine unterstützt.

Die beiden Sichten werden in den Abschnitten 3.1 und 3.2 näher beschrieben. Das System besteht insgesamt aus vier Hauptkomponenten:

- Das integrierte *Geographische Informationssystem (GIS)* dient zur Verarbeitung und Visualisierung raumbezogener Daten.
- Das *Daten- und Methodenbanksystem* verwaltet importierte und berechnete Daten und stellt Methoden zur Transformation und Auswertung der Daten zur Verfügung.
- Das objektorientierte *Modell- und Experimentbanksystem* verwaltet die Modelle und Spezifikationen von Modellexperimenten.
- Die *MOBILE-Skript-Maschine (MSM)* interpretiert Spezifikationen von Modellexperimenten, die in einer hierfür entwickelten Sprache formuliert werden (MOBILE Script Language, MSL, siehe Mügge/Hilty 1996).

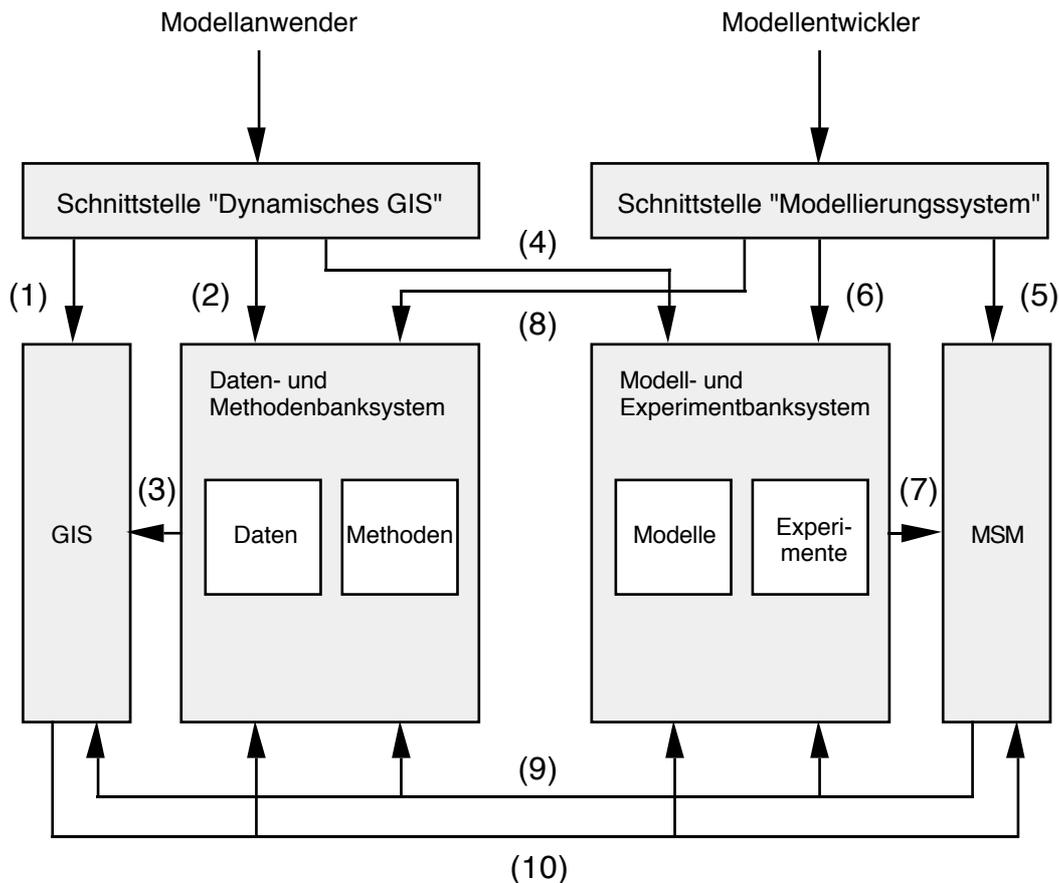
Mit dem GIS und dem Daten- und Methodenbanksystem werden im wesentlichen die statischen Aspekte der zu bearbeitenden Aufgaben abgedeckt (linke Hälfte von Abb. 3-1). Dagegen dient die MSM zusammen mit dem Modell- und Experimentbanksystem zur Bearbeitung der dynamischen Aspekte. Durch die Kopplung der Teilsysteme in einer Client/Server-Architektur können diese Funktionalitäten flexibel kombiniert werden; so kann das GIS die Ausführung von Modellexperimenten anstoßen, hierfür raumbezogene Eingabedaten zur Verfügung stellen und die zurückgelieferten Simulationsergebnisse wiederum raumbezogen visualisieren. Umgekehrt kann die MSM bei der Abarbeitung von Modellexperimenten Daten und Methoden vom GIS oder vom Daten- und Methodenbanksystem abrufen.

### **3.1 Das System aus Sicht des Modellanwenders: ein dynamisches GIS**

Geographische Informationssysteme (GIS) sind auf die Verwaltung und Verarbeitung raumbezogener Daten spezialisiert (siehe die Begriffsklärung zu GIS auf der übernächsten Seite). Die Darstellung zeitabhängiger Daten mit GIS stößt dagegen rasch an Grenzen; dies gilt um so mehr für die Simulation dynamischer Prozesse.

Für Aufgaben im Umweltbereich ist aber gerade die Verbindung von Raum- und Zeitbezug, von räumlicher Struktur und zeitlicher Dynamik charakteristisch. Bossel (1995) sieht daher als eine von fünf Forschungsaufgaben der Umweltinformatik die „Integration lokal parametrisierter dynamischer Systemmodelle in geographische Informationssysteme (dynamisches GIS)“ (Bossel 1995, S. 42).

Wir gehen davon aus, daß die Modellanwender (Planer, Gutachter und andere Experten des Anwendungsgebietes, s.o.) mit der Benutzung eines GIS vertraut sind. Deshalb gibt die für sie vorgesehene Benutzungsschnittstelle die Möglichkeit, direkt auf das GIS zuzugreifen und in gewohnter Weise damit zu arbeiten (Pfeilverbindung 1 in Abbildung 3-1).



**Abb. 3-1:** Architektur des MOBILE-Systems

Auf diesem Wege können z.B. Verkehrsnetze eingegeben werden. Eine einfache Vorgehensweise ist die Verwendung einer digitalen Rasterkarte und das manuelle Vektorisieren der benötigten Verkehrswege am Bildschirm.

In kleinen Schritten kann der Benutzer nun die Funktionalität des GIS um dynamische Aspekte erweitern. Soweit es um die Darstellung und Verarbeitung zeitbezogener Daten geht, bietet das Daten- und Methodenbanksystem einige das GIS ergänzende Möglichkeiten, z.B. Datenstrukturen und Operationen für Zeitreihen (2).

Zu den Methoden<sub>MS</sub> (vgl. die Begriffsklärung auf S. 19), die das Methodenbanksystem verwaltet, gehören auch Verfahren zur Datenvisualisierung (z.B. die Visualisierung von Verkehrsstärken in Wegenetzen oder von Schadstoffkonzentrationen in der Fläche). Zum Datenaustausch zwischen dem Daten- und Methodenbanksystem auf der einen und dem GIS auf der anderen Seite dient Verbindung (3), wobei das GIS hier die Rolle des Servers spielt.

Der Benutzer hat ferner Zugriff auf das Modell- und Experimentbanksystem (4), das ihm die Auswahl aus vorhandenen Modellklassen, die Instantiierung von Modellen, die Verknüpfung der Instanzen und die Spezifikation von Experimenten ermöglicht. Die Experimente sind wie die Methoden<sub>MS</sub> und die Modelle in einer Klassenhierarchie organisiert.

### **Begriffsklärung: Geographisches Informationssystem (GIS)**

„A geographic information system (GIS) is an information system that is designed to work with data referenced by spatial or geographic coordinates. In other words, a GIS is both a database system with specific capabilities for spatial-referenced data, as well a set of operations for working with the data [...].“ (Star/Estes 1990, S. 2f)

„Nach dem heutigen Sprachgebrauch bezieht sich die Bezeichnung GIS [...] auf den Fall, daß unter Einsatz digitaler Technologien objektorientierte Modelle der Umwelt erzeugt und daraus Geo-Informationen abgeleitet und dargestellt werden.“ (Hake/Grünreich 1994, S. 498f)

Der Modellanwender kann die Modell- und Experimentbank veranlassen, Experimentspezifikationen in MSL der MSM zur Ausführung zu übergeben (7).

Die Ausführung von Modellexperimenten kann prinzipiell unabhängig vom GIS erfolgen. Interessanter sind aber die Fälle, in denen die Experimentspezifikation auf Daten oder Methoden<sub>MS</sub> aus dem GIS bzw. der Daten- und Methodenbank Bezug nimmt. Beispielsweise kann ein Experiment vorsehen, ein im GIS als Vektorkarte vorliegendes Straßennetz als Eingabedatum für ein Modell zu verwenden, die Simulationsergebnisse mit einer bestimmten statistischen Methode auszuwerten, in der Datenbank abzulegen und danach im GIS mit einem bestimmten Verfahren zu visualisieren. Die MSM, die solche Spezifikationen interpretiert, kann für solche Zwecke auf die anderen Systemkomponenten zugreifen (9), die in diesem Fall wiederum als Server angesprochen werden.

Der Modellanwender hat die Möglichkeit, häufig durchgeführte Experimente als Standardexperimente zu deklarieren. Diese werden vom GIS aus angestoßen, wobei alle Details der Ausführung dem GIS-Benutzer verborgen bleiben. Damit wird das GIS zum Client, der eine Experimentspezifikation aus der Experimentbank abrufen, mit Daten versorgt, der MSM zur Ausführung übergibt und die Ergebnisse zurückbekommt (10). Beispielsweise kann das GIS durch Konfiguration seiner Menüs um eine Funktion „Verkehrsumlegung“ erweitert werden, die dann im Hintergrund durch Ausführung eines Verkehrsumlegungsmodells in einem einfachen, standardisierten Modellexperiment realisiert wird.

Mit der zuletzt beschriebenen Form der Kopplung ist die höchste Stufe der Integration von GIS- und Simulationsfunktionalitäten erreicht. Allerdings ist dieser Weg auch anfälliger für einen unkritischen Umgang mit den Modellen und für Fehlinterpretationen. Es bleibt dem Benutzer überlassen, welche der beschriebenen Anwendungsmodi des MOBILE-Systems er für seine konkrete Aufgabenstellung verwenden will.

### **3.2 Das System aus Sicht des Modellentwicklers: ein objektorientiertes Modellierungssystem**

Dem Modellentwickler präsentiert sich das System als ein objektorientiertes Modellierungssystem. Die für ihn vorgesehene Schnittstelle unterstützt in erster Linie die Modellbildung und Simulation in einer objektorientierten Umgebung. Modelle werden in eine Klassenhierarchie eingeordnet; Instantiierung eines Modells bedeutet Spezifikation der Modellparameter. (Für eine detailliertere Darstellung des Modellierungskonzepts siehe Mügge/Meyer 1996 und Mügge/Hilty 1996.)

Der Modellentwickler hat im Gegensatz zum Modellanwender einen direkten Zugang zur MOBILE-Skript-Maschine (MSM) und kann – insbesondere zu Testzwecken – Modellexperimente ad hoc spezifizieren und direkt in den Ablauf der Experimente eingreifen (5).

Daneben interagiert er hauptsächlich mit dem Modell- und Experimentbanksystem (6) und hat die Möglichkeit, neue atomare Modellbausteine einzufügen, die nicht durch Verknüpfung der vorhandenen erstellt werden können.

Zum Testen von Modellen sind Daten und Auswertungsmethoden erforderlich, auf die der Modellentwickler über die Verbindung (8) zugreifen kann. Über die Kombination von (8) und (3) kann er auch im GIS gespeicherte Daten (z.B. ein Verkehrsnetz) auswählen, die er zu Testzwecken verwenden möchte.

Der automatisierte Zugriff auf Modelle, Daten und Methoden<sub>MS</sub> während des Ablaufs von Modellexperimenten findet dagegen, wie in 3.1 bereits beschrieben, über Verbindung (9) statt.

## 4 Stand der Realisierung

Die in Kapitel 3 beschriebene Systemarchitektur wird schrittweise durch Realisierung von Systemkomponenten und deren Integration umgesetzt. Der Vorteil dieser Bottom-Up-Strategie besteht darin, daß einige Komponenten zunächst als Insellösungen getestet und durch „manuelle“ Verknüpfung (Dateitransfer) auch in ihrem Zusammenspiel erprobt werden können. Gleichzeitig mit der Realisierung der Komponenten wird eine plattformübergreifende Kommunikations-Infrastruktur aufgebaut, so daß die Insellösungen zu einem heterogenen verteilten System zusammenwachsen.

Die Schnittstelle für den Modellanwender wird auf einem Apple Power-Macintosh, diejenige für den Modellentwickler auf einer UNIX-Workstation realisiert, die den Rechenaufwand für parallelisierbare Modellexperimente wiederum in einem Netz von Workstations verteilen kann.

Die Modellbank umfaßt derzeit folgende Modelle, die vorerst hauptsächlich exemplarischen Charakter haben:

- Verkehrsumlegungsmodell räumlich: Gegeben sind u.a. ein Straßennetz mit Strecken- und Knotenattributen und eine zeitlich differenzierte Verflechtungsmatrix; berechnet werden für jeden Zeitpunkt die Verkehrsstärken und mittleren Geschwindigkeiten auf den Straßen (Nutzergleichgewichtsmodell).
- Verkehrsumlegungsmodell raumzeitlich: Dieses Modell kann zusätzlich zur räumlichen Verkehrsumlegung die zeitliche Verschiebung von Fahrten berücksichtigen, die einem definierten Anteil der Verkehrsteilnehmer möglich ist und unter parametrisierbaren Bedingungen vorgenommen wird. (Denkbare Anwendungen dieses Modells sind z.B. Untersuchungen zu Verkehrseffekten der Flexibilisierung von Arbeits- oder Ladenöffnungszeiten.)
- Kapazitätsmodell für Straßen: Ermittelt auf der Grundlage eines Straßennetzes mit Straßentypen, Höchstgeschwindigkeiten und aktuellen Verkehrsstärken die mittleren Geschwindigkeiten gemäß den Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS-W); dieses Modell wird primär als Teilmodell von Umlegungsmodellen verwendet.
- Mikroskopisches Verkehrsflußmodell: Dieses Modell kann zur Simulation von Engpässen im Straßenverkehr (ursprüngliche Anwendung war der Hamburger Elbtunnel; vgl. Oehler/Kröger 1995) eingesetzt werden, bei denen die Bewegungen der einzelnen Fahrzeuge (Beschleunigen, Abbremsen, Spurwechsel usw.) eine wesentliche Rolle spielen; es wird z. Zt. verallgemeinert und neu implementiert.
- Emissionsmodell: Berechnet abhängig von Verkehrsstärke, Verkehrsmix und Durchschnittsgeschwindigkeit die Emissionsraten (Schadstoffe  $\text{NO}_x$ , CO, HC u.a.) für eine Strecke als Linienquelle.
- Ausbreitungsmodell: Dies ist ein Partikelsimulationsmodell, das die Ausbreitung von Luftschadstoffen in ebenem Gelände und ausgewählte chemische Reaktionen simuliert (Weihrauch 1995).

Um das MOBILE -System als heterogenes verteiltes System realisieren zu können und maximale Flexibilität bei der Integration vorhandener „Insellösungen“ zu erreichen, wurden die folgenden Kopplungsmöglichkeiten erprobt bzw. entwickelt:

- DCE (Distributed Computing Environment) für UNIX/UNIX-Kopplungen: (a) Aufbau von Client- und Serverprogrammen (Stubs) und gegenseitiges Bekanntmachen der aufrufbaren Funktionen mit Hilfe von IDL-Skripts (Interface Definition Language); (b) Aufruf einer Serverfunktion durch einen Client mit Übergabe von Parametern, die der Server an seine Servicefunktion weiterleitet. Anschließend Rückgabe des Ergebnisses der Servicefunktion an den Client; (c) lokaler „Rollentausch“ des Servers: Ein Client ruft (wie in b) einen Server auf. Dieser stellt fest, daß er den Service nicht selbst vollständig erbringen kann und muß nun seinerseits als Client auftreten und einen weiteren Server aufrufen. Dessen Rückgabe wird dann ggf. weiterbearbeitet und an den ursprünglichen Client zurückgegeben; (d) kontrollierbares Fehlerverhalten, z.B. falls der (unmittelbare oder mittelbare) Server nicht verfügbar ist.
- Tycoon (Typed Communicating Objects in Open Environments; Matthes 1993): Diese Programmierumgebung für persistente Objektsysteme wurde als Mittel zur plattformübergreifenden (MacOS/UNIX) Integration von MOBILE -Systemkomponenten zunächst experimentell eingesetzt.
- HTTP (Hypertext Transfer Protocol): Durch Ankopplung eines WWW-Browsers an Komponenten des MOBILE-Systems (bisher für das GIS MapInfo realisiert) können über das Internet Daten an einen MOBILE-WWW-Server gesandt werden; durch Verwendung sogenannter CGI-Skripts auf Seiten des WWW-Servers können so beliebige Programme auf einer UNIX-Workstation von einer anderen (z.B. Macintosh-)Plattform aus mit Daten versorgt und gestartet werden. Die Rückführung der Ergebnisse kann automatisch und für den Benutzer unsichtbar durchgeführt werden.

## 5 Ausblick

Die Realisierung aller in Abbildung 3-1 gezeigten Komponenten und der Abschluß ihrer Integration ist für Ende 1997 geplant. Einige prototypisch realisierte Komponenten können aber bereits heute genutzt werden. Ebenso wird die Integration kontinuierlich vorangetrieben, so daß das System im Laufe seiner Entwicklung für praxisnahe Aufgaben mit stetig wachsendem Anspruchsniveau einsetzbar wird. Solche *Fallstudien* bieten die Möglichkeit, die Tragfähigkeit der Konzepte zu überprüfen und ggf. Kurskorrekturen vorzunehmen.

Ein Schwerpunkt für die geplanten Fallstudien ist der Bereich City-Logistik, der im folgenden Abschnitt als Anwendungsgebiet skizziert wird.

### 5.1 Anwendungsgebiet City-Logistik

In der Diskussion um eine stadtverträgliche Gestaltung des städtischen Güterverkehrs ist immer häufiger von City-Logistik die Rede. Dahinter steht die unternehmensübergreifende Kooperation von Spediteuren mit dem Ziel, die betriebswirtschaftliche Situation im städtischen Lieferverkehr zu verbessern, dabei gleichzeitig Verbesserungen der städtischen Verkehrssituation zu erreichen sowie ökologische Belastungen durch den speditionellen Lieferverkehr zu verringern.

Realisiert werden soll dies durch intelligente Ladungsbündelung im Lieferverkehr. Mehrere Spediteure betreiben die Auslieferung ihrer Sendungen gemeinsam. Unterschieden werden dabei Tourenverdichtung und Sendungsverdichtung (Bretzke 1993). Bei der *Tourenverdichtung* fährt ein Fahrzeug dicht beieinander liegende Empfänger an. Die Distanzen zwischen den einzelnen Stops werden also verringert. Anstatt daß beispielsweise ein Spediteur einen Lkw mit Ladung für drei Empfänger in verschiedenen äußeren Stadtteilen und mehrere Empfänger in der City belädt, können mehrere Spediteure je einen Lkw für einzelne äußere Stadtteile oder -gebiete und für die City einsetzen. Bei der *Sendungsverdichtung* werden Sendungen aus verschiedenen Quellen für einen Empfänger nicht auf mehrere, sondern nach Möglichkeit auf nur ein Fahrzeug geladen. Der Empfänger wird also nicht von jedem Spediteur separat angefahren, sondern nur einmal von allen Spediteuren.

Konzeptionell können weiterhin das Kooperationskonzept und das Terminalkonzept voneinander unterschieden werden (Deecke et al. 1995, S. 237-258). Beim *Kooperationskonzept* erfolgt vor dem eigentlichen Verteilvorgang ein Sammelprozeß, bei dem die Lieferfahrzeuge die einzelnen Speditionshöfe abfahren und dort jeweils die auszuliefernde Ladung aufnehmen. Beim *Terminalkonzept* hingegen wird die zu verteilende Ladung in einem Konsolidierungsterminal und nicht bei den jeweiligen Spediteuren gesammelt. Das Terminalkonzept hat sich bisher bei den speditionellen City-Logistik-Projekten nicht durchgesetzt. Das gleiche Prinzip wird aber in starkem Maße von Kaufhäusern und dem filialisierten Einzelhandel praktiziert, deren Möglichkeiten zur Beeinflussung der Warenströme wesentlich größer sind als die der Spediteure.

Nach einem jüngst veröffentlichten Überblick (vgl. Logistik Heute 10/95, Sonderbeilage City-Logistik) gibt es in der Bundesrepublik mehrere Dutzend City-Logistik-Projekte, die bereits arbeiten, in der Planung oder in der Diskussion sind. Die Erfahrungen sind überwiegend positiv. Dies betrifft sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Aspekte der City-Logistik-Projekte. Gleichwohl ist festzustellen, daß die anfängliche Euphorie, die viele Akteure ergriffen hatte, mehr und mehr einer realistischeren Skepsis weicht (vgl. Hatzfeld/ Hesse 1994, S. 646-653).

Mehr und mehr wird deutlich, daß mit den jetzigen City-Logistik-Projekten erst ein kleiner Schritt auf dem Weg zum stadtverträglichen Güterverkehr getan ist.

Zwei unterschiedliche Perspektiven der Weiterentwicklung können unterschieden werden. Zum einen geht es dabei um eine stärkere Integration und Verkopplung der City-Logistik mit den komplexen Logistik- und Wertschöpfungsketten von Industrie und Handel. „City-Logistik ist weit mehr als die Bündelung von Sendungen für die Innenstadt. Schon allein die Bezeichnung Logistik unterstreicht, daß es nicht nur um den Verkehr geht; wenn man nur diesen reduzieren will, dann kann man den Zusatz ‚Logistik‘ auch weglassen [...] Wenn es um Themen wie Geschäftsprozeßoptimierung oder um Prozeßkettencontrolling geht, kann das Geflecht der Optimierung gar nicht komplex und durchgängig genug sein. Bei der City-Logistik scheint dagegen schon das Bündeln der Waren von drei Speditionen die Grenzen der verkraftbaren Komplexität zu überschreiten. Man kann nicht einerseits Logistik verwirklichen, andererseits aber den Status quo zementieren wollen. Richtig verstandene Logistik ist zwangsläufig mit Veränderung, Wandel und Innovation verbunden – und das gilt auch für die City-Logistik“ (Würmser 1995, S. 3).

In einer anderen Perspektive steht die Stadtverträglichkeit städtischer Güterverkehre im Mittelpunkt. Es wird auf die räumlichen, sachlichen, konzeptionellen und akteursspezifischen Begrenzungen der bisherigen City-Logistik-Projekte hingewiesen und für eine Ausweitung der City-Logistik zur Stadtlogistik plädiert (Deecke et al. 1995):

- *räumlich* soll sich Stadtlogistik nicht mehr nur auf die City, sondern tendenziell auf alle städtischen Räume beziehen;
- *sachlich* sollen nicht mehr nur die Lieferverkehre für den Einzelhandel, sondern alle Material- und Transportströme im Stadtraum erfaßt werden;
- *konzeptionell* steht die am Kreislaufgedanken orientierte Optimierung des gesamten Material- und Transportflusses im Vordergrund und
- *akteursspezifisch* sollen die Kommunen für privatwirtschaftliche Akteure einen perspektivischen Handlungsrahmen durch Moderation und kooperative Erarbeitung regulativer Rahmenbedingungen setzen.

Dieses erweiterte Verständnis von City-Logistik erfordert die Entwicklung von Werkzeugen zur Maßnahmenevaluation, die eine enge Verbindung von raumbezogener Informationsverarbeitung mit Simulationstechniken vorsehen. Hierzu soll das MOBILE-Projekt beitragen.

## Literatur

- Albrecht, V.; Dobe, C.; Dölger, R.; Franke, I.; Sigler, S. (1992): MOBIT – Ein Simulationsprogramm zum Stadtverkehr. Handbuch. Frankfurt am Main: Institut für Didaktik der Geographie (Bausteine und Materialien zur Fachdidaktik und Umwelterziehung; 1)
- Bossel, H. (1995): Umweltproblematik und Informationsverarbeitung. In: Page/Hilty (1995), S. 33-42
- Bretzke, W. R. (1993): City-Logistik – Problemlösungen durch logistische Dienstleistungen? Internationales Verkehrswesen 12/93, S. 703-706
- Bundesminister für Verkehr (Hrsg.) (1994): Verkehr in Zahlen 1994. Berlin: Berliner Buchdruckerei Union
- Deecke, H.; Glaser, J.; Läßle, D. (1995): City- und Stadtlogistik im Spannungsfeld privater und öffentlicher Akteure. In: Läßle, D. (Hrsg.): Güterverkehr, Logistik und Umwelt. Berlin: Edition Sigma, S. 237-258
- Feix, F.; Wolfinger, B. (1992): Analytical models for file transfers in packet-switched computer networks. Appl. Math. and Comp. Sci., 1992, vol. 2, No. 2, S. 171-197
- Freese, H.; Häuslein, A.; Isbarn, I.; Klee, A.; Niederle, W.; Page, B.; Seidel, J. (1994): Ein Werkzeug zur Modellierung der Verkehrsträgeremissionen auf der Basis einer tabellenorientierten, grafischen Simulationsmethodik. In: Hilty, L. M.; Jaeschke, A.; Page, B.; Schwabl, A. (Hrsg.): Informatik für den Umweltschutz, 8. Symposium, Hamburg 1994, Bd. I. Marburg: Metropolis, S. 327-334 (Umwelt-Informatik aktuell; 1)
- Grützner, R.; Häuslein, A.; Page, B. (1995): Werkzeuge für die Umweltmodellierung und -simulation. In: Page/Hilty (1995), S. 191-218
- Hake, G.; Grünreich, D. (1994): Kartographie. Berlin: de Gruyter
- Hatzfeld, U.; Hesse, M. (1994): Stadtlogistik – Interessen „statt Logistik“. Internationales Verkehrswesen 11/94, S. 646-653
- Hensel, H. (1978): Wörterbuch und Modellsammlung zum Algorithmus der Verkehrsprognose, 2. Auflage. Aachen: Institut für Stadtbauwesen (Berichte – Stadt, Region, Land)
- Hilty, L. M.; Page, B. (1986): Anwendungsmöglichkeiten von Methoden- und Modellbanksystemen im Umweltbereich. In: Page, B. (Hrsg.): Informatik im Umweltschutz – Anwendungen und Perspektiven. München, Wien: Oldenbourg, S. 331-347
- Hilty, L. M.; Rolf, A. (1992): Anforderungen an ein ökologisch orientiertes Logistik-Informationssystem. In: Görke, W.; Rininsland, H.; Syrbe, M. (Hrsg.): GI – 22. □ Jahrestagung – Information als Produktionsfaktor, Karlsruhe. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer, S. 254-263
- Hilty, L. M.; Martinssen, D. (1993): Umweltwirkungen logistischer Strategien – Simulation als Analyseinstrument. In: Jaeschke, A.; Kämpke, T.; Page, B.; Radermacher, F. (Hrsg.): Informatik für den Umweltschutz, Proc. 7. Symposium, Ulm, 31. März - 2. April 1993. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer, S. 142-153

- Hilty, L. M. (1994): Ökologische Bewertung von Verkehrs- und Logistiksystemen – Ökobilanzen und Computersimulation. St.Gallen: Institut für Wirtschaft und Ökologie an der Hochschule St.Gallen (Diskussionsbeiträge des IWÖ-HSG; 18)
- Hilty, L. M.; Weiland, U. (1994): Sustainable Cities – Opportunities and Risks of Information Technology. In: Brunnstein, K.; Raubold, E. (Hrsg.): Proceedings of the 13th World Computer Congress. Volume II: Applications and Impacts. Amsterdam: Elsevier, S. 613-618
- Hilty, L. M.; Martinssen, D.; Page, B. (1994): Designing a Simulation Tool for the Environmental Assessment of Logistical Systems and Strategies. In: Guariso, G.; Page, B. (eds.): Computer Support for Environmental Impact Assessment. IFIP Transactions B-16. Amsterdam: North-Holland, S. 187-198
- Hilty, L. M.; Mügge, H. (1996): Metadata in model base systems. In: Proceedings International Seminar Environmental Research Information System UFIS. München: GSF
- Hummell, H.J. (1980): Experiment in den Sozialwissenschaften. In: Speck, J. (Hrsg.): Handbuch wissenschaftstheoretischer Begriffe, Bd. 1. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, S. 210-216
- Klösgen, W.; Schwarz, W.; Honermeier, A. (1983): Modellbanksystem (MBS) zur Unterstützung der Arbeit mit sozio-ökonomischen Planungsmodellen. Bonn: GMD (Arbeitspapiere der GMD; 32)
- Lechler, T. (1996): Klassifikation von Verkehrsmodellen. In: Proceedings des 6. Workshops des GI-Arbeitskreises „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umweltanwendungen“, 13.-15.3.1996, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Logistik Heute (1995) 10, Sonderbeilage City-Logistik
- Matthes, F. (1993): Persistente Objektsysteme – Integrierte Datenbankentwicklung und Programmerstellung. Berlin: Springer
- Meyer, R.; Hilty, L. M. (1996): Modellvarianten in einer Simulationsstudie zu den Auswirkungen einer Umgehungsstraße auf die Emission von Luftschadstoffen (in Vorbereitung)
- Meyer, R.; Poll, M.; Mügge, H.; Gerken, B.; Hilty, L. M. (1995): Anforderungen für den Einsatz eines Geographischen Informationssystems (GIS) in der umweltbezogenen Verkehrssimulation. In: Kremers, H.; Pillmann, W. (Hrsg.): Raum und Zeit in Umweltinformationssystemen – Space and Time in Environmental Information Systems. 9th International Symposium on Computer Science for Environmental Protection CSEP '95. Marburg: Metropolis, S.376-384
- Minsch, J. (1992): Grundlagen und Ansatzpunkte einer ökologischen Wirtschaftspolitik. In: Glauber, H.; Pfriem, R. (Hrsg.): Ökologisch wirtschaften. Frankfurt a. M.: Fischer TB
- Mügge, H.; Hilty, L. M. (1996): MSL – eine Modell- und Experiment-Beschreibungssprache. In: Intelligente Methoden zur Verarbeitung von Umweltinformationen. Proceedings des 2. Bremer KI-Pfingstworkshops. Marburg: Metropolis (im Druck)

- Mügge, H.; Meyer, R. (1996): Beschreibung von Modellexperimenten in der MOBILE Script Language (MSL). In: Proceedings des 6. Workshops des GI-Arbeitskreises „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“, 13.-15.3.1996, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Oehler, M.; Kröger, K.-H. (1995): Mikroskopische Simulation von Autobahnabschnitten am Beispiel des Elbtunnels. Studienarbeit am Fachbereich Informatik der der Universität Hamburg
- Ortuzar, J.D. de; Willumsen, L.G. (1994): Modelling transport, 2. ed. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: Wiley & Sons
- Page, B. (1991): Diskrete Simulation – Eine Einführung mit Modula-2. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer (Springer-Lehrbuch)
- Page, B.; Hilty, L. M. (Hrsg.) (1995): Umweltinformatik – Informatikmethoden für Umweltschutz und Umweltforschung, 2. Auflage. München, Wien: Oldenbourg (Handbuch der Informatik; 13.3)
- Star, J.; Estes, J. (1990): Geographic Information Systems – An Introduction. Englewood Cliffs: Prentice Hall
- Walder, E.; Hofstetter, P.; Frischknecht, R. (1991): Bewertungsmodelle für Ökobilanzen. Arbeitspapier 2/91 des Projekts „Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung“. Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich.
- Weihrauch, L. (1995): Entwicklung eines einfachen Ausbreitungsmodells unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Umsetzungen. Studienarbeit am Fachbereich Informatik der der Universität Hamburg
- Wermuth, M. (1994): Modellvorstellungen zur Prognose. In: Steierwald, G.; Künne, H.-D. (1994): Stadtverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele. Berlin: Springer, S.□221-274
- Würmser, A. (1995): Stadtgespräch. Logistik Heute (1995) 10, Sonderbeilage City-Logistik

## **Anhang A: Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen**

|        |   |
|--------|---|
| DCE    | Distributed Computing Environment                               |
| GIS    | Geographisches Informationssystem                               |
| HTTP   | Hypertext Transfer Protocol                                     |
| IDL    | Interface Definition Language                                   |
| JIT    | Just in time  |
| Kfz    | Kraftfahrzeug   |
| Lkw    | Lastkraftwagen  |
| MIV    | Motorisierter Individualverkehr                                 |
| MOBILE | Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment |
| MSL    | MOBILE Script Language  |
| MSM    | MOBILE Script Machine   |
| NMV    | Nichtmotorisierter Verkehr                                      |
| ÖPNV   | Öffentlicher Personen-Nahverkehr                                |
| ÖV     | Öffentlicher Verkehr  |
| Pkw    | Personenkraftwagen  |
| Tycoon | Typed Communicating Objects in Open Environments                |
| VSA    | Vier-Stufen-Algorithmus (der Verkehrsprognose)                  |
| WWW    | World Wide Web  |

## **Anhang B: MOBILE im WWW**

Ein Teil der Arbeit des MOBILE-Projekts besteht darin, Verkehrsmodelle zu recherchieren und zu klassifizieren, um ihre Verwendbarkeit für die Modellbank zu prüfen. Hierfür wurde ein Klassifikationsschema für Verkehrsmodelle entwickelt (Lechler 1996). Die Ergebnisse dieser Recherche und Klassifikation und weitere Informationen über MOBILE sind ab Frühjahr 1996 im WWW unter der folgenden URL zugänglich:

[http://www.informatik.uni-hamburg.de/ASI/MOBILE\\_home.html](http://www.informatik.uni-hamburg.de/ASI/MOBILE_home.html)