



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

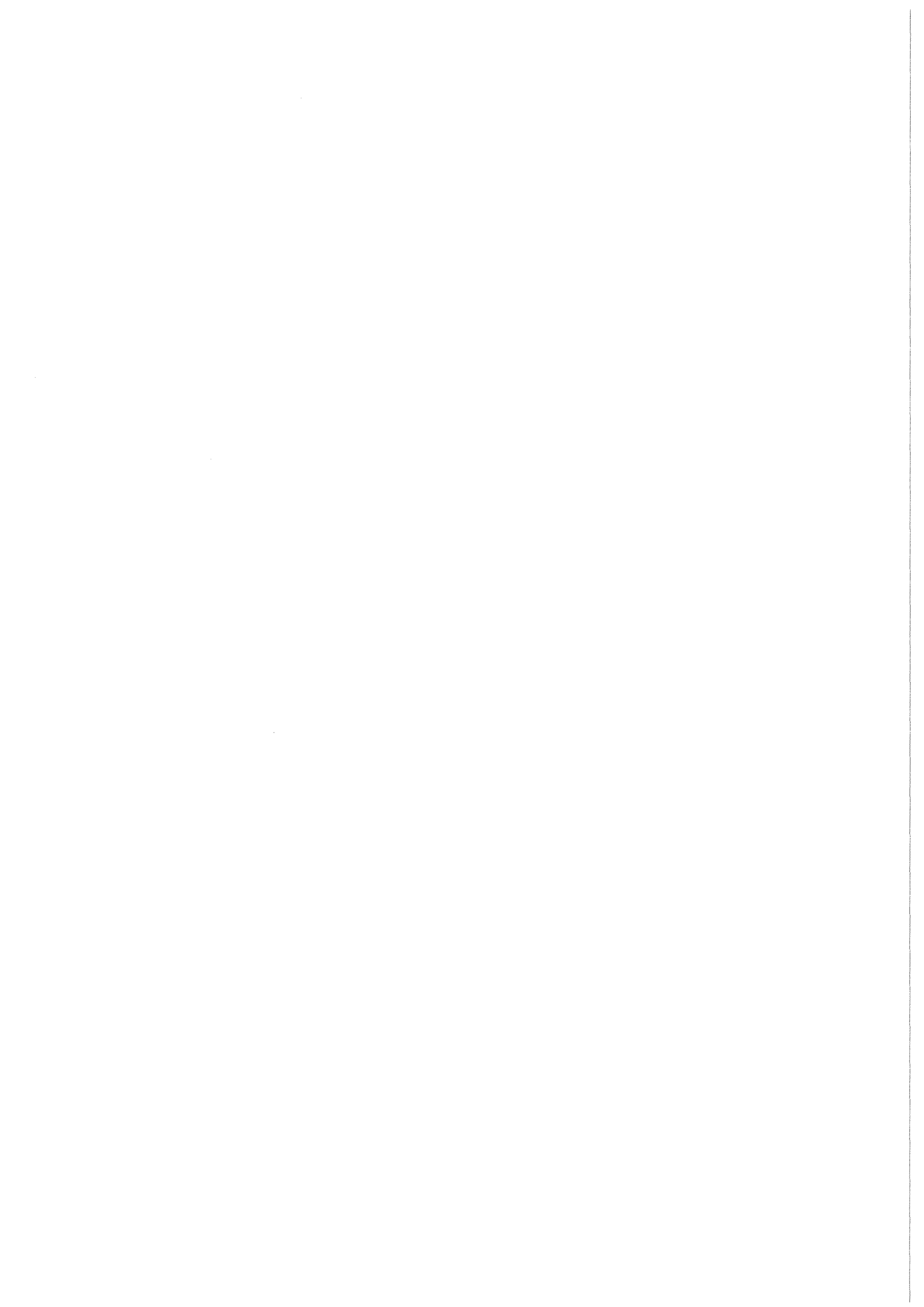
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5829

**6. Treffen des AK
Werkzeuge für Simulation
und Modellbildung in
Umweltanwendungen
13.3. – 15.3.1996, Magdeburg**

H. B. Keller, R. Grützner, R. Hohmann (Hrsg.)

**Institut für Angewandte Informatik
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren**

Oktober 1996



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5829

6. Treffen des AK
Werkzeuge für Simulation und Modellbildung
in Umweltsanwendungen
13.3.-15.3.1996, Magdeburg

Hubert B. Keller, Rolf Grützner¹⁾, R. Hohmann²⁾ (Hrsg.)

Institut für Angewandte Informatik
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

¹⁾Universität Rostock
²⁾Universität Magdeburg

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1996

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung:

Dieser Bericht stellt die Beiträge des 6. Treffen des AK Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“ des Fachausschuß 4.6, „Informatik im Umweltschutz“, der Gesellschaft für Informatik (GI) vom 13.3. - 15.3.1996 in Magdeburg in schriftlicher Form dar.

**6th Meeting of the WG
Tools for Simulation and Modelling in Environmental
Applications**

Abstract:

This report contains the papers of the 6th meeting of the WG „Tools for Simulation and Modelling in Environmental Applications“, of the section 4.6 „Computer Science for Environmental Protection“, of the Society for Computer Science (GI), which took place at Magdeburg, Germany, on 13th - 15th of march in 1996.

Vorbemerkung

Der Workshop "6. Treffen des Arbeitskreises 5: Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen" wurde vom 13.3.1996 bis zum 15.3.1996 am FB Informatik der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg durchgeführt. In zweieinhalb Tagen fanden 23 Vorträge vor ca. 40 Teilnehmern statt. Schwerpunkte des Workshops waren:

- Modellier- und Simulationsmethoden und ihre Anwendungen in unterschiedlichen Umweltbereichen
- Verkehrs- und Logistikmodellierung unter Umweltaspekten und
- Ansätze zur Analyse und Bewertung von Produktions- und betrieblichen Prozessen bezüglich ihrer Umweltwirkung.

Die Komplexität und vielfältige noch unklare Kausalbeziehungen bei den Umweltsystemen verlangen die Anwendung von innovativen Methoden für ihre Modellierung und Analyse. Die Entwicklung strukturadäquater Modelle ist eine weitere wichtige Voraussetzung zur Lösung der anstehenden Umweltprobleme.

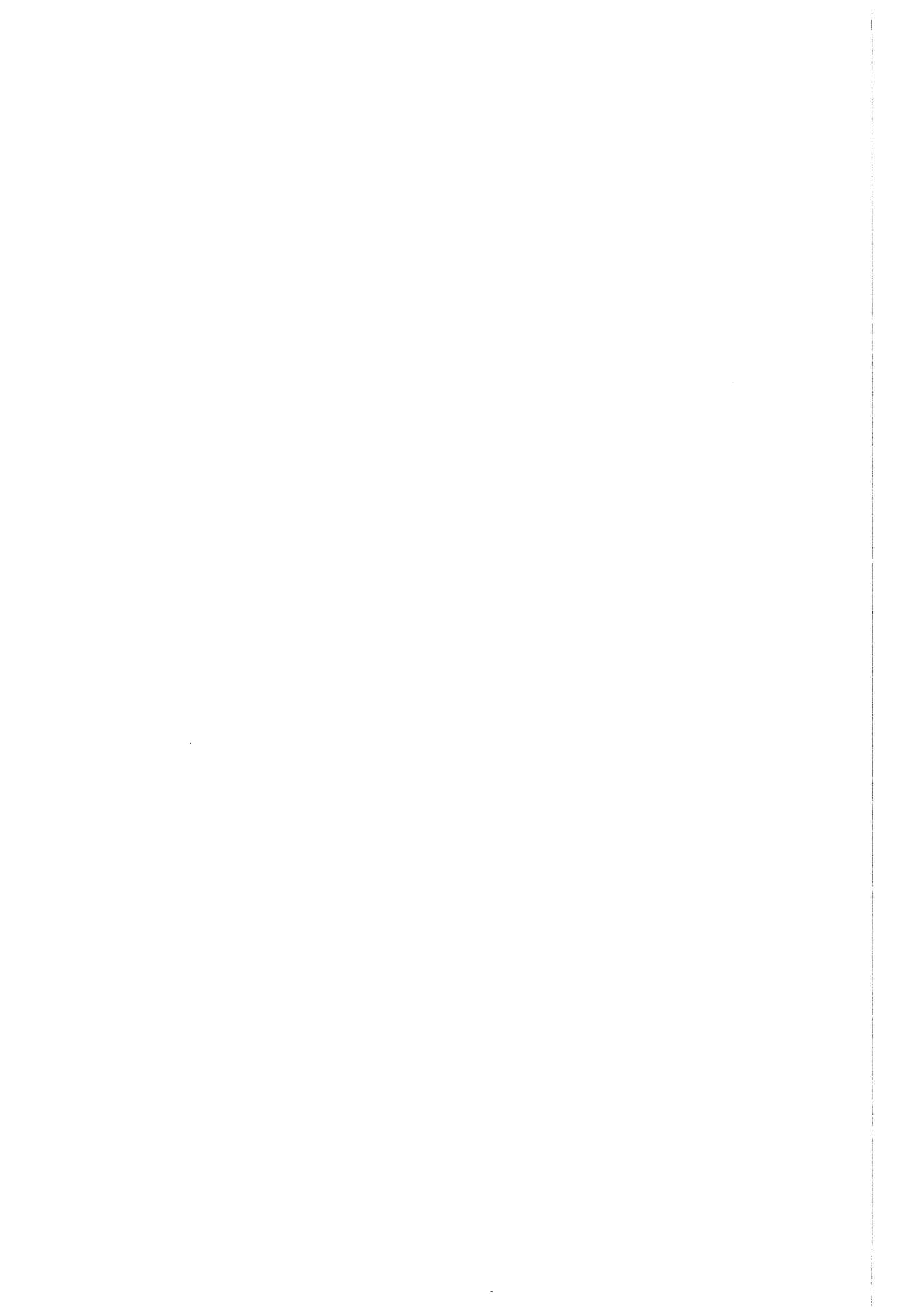
Erfreulich ist die Tatsache, daß eine nicht unbedeutende Zahl von Beiträgen des Workshops sich verstärkt diesen Problemstellungen und Werkzeugen zugewendet hat. So konnten wesentliche Erkenntnisse im Rahmen von Landschaftsmodellierungen mit neuronalen und Fuzzy-Ansätzen gewonnen werden, die auf andere Weise nur schwer erreichbar wären. Auch auf die Steuerung von Kreislaufwirtschaften, die Modellierung von Prozessen im Wasser und von Verkehrsprozessen trifft diese Aussage zu.

In dem Zusammenhang ist auch die effektive Speicherung von Daten und Modellen zu sehen. So wird es notwendig, die zahlreichen Modelle, die mit erheblichem Aufwand entwickelt wurden, mehrfach zu nutzen. Das setzt Gültigkeits- und Konsistenzprüfungen sowie eine umfassende Dokumentation voraus, um auch semantische Kontrollen (den Anwendungsbereich betreffend) durchführen zu können. Diesem Fragespektrum widmeten sich weitere Vorträge, auch in Hinblick auf eine Kopplung von Geoinformationssystemen und Simulationssystemen. Es ist zu hoffen, daß mit dem 6. Treffen ein Beitrag zur Weiterentwicklung von Informatikwerkzeugen und -konzepten für die Analyse von Umweltsystemen geleistet wurde.

An dieser Stelle sei der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg und dem FB Informatik dafür gedankt, daß der Workshop hier durchgeführt werden konnte. Besonders zu danken ist Herrn Dr. R. Hohmann vom FB Informatik für die hervorragende organisatorische Vorbereitung, die sicher mit erheblichem Zeitaufwand verbunden war.

Wie auch für die vorangegangenen Workshops erfolgt die Veröffentlichung der Beiträge wieder in den Berichten des Forschungszentrums Karlsruhe. Dafür und für die redaktionelle Aufbereitung sei Herrn Dr. H-B. Keller, FZ-Karlsruhe gedankt. Der nächste Workshop findet im März 1997 an der Universität Oldenburg statt.

Leiter des Arbeitskreises 5
Prof. Dr. habil. Rolf Grützner



Inhaltsverzeichnis

1 Abbildung von Umwelteinwirkungen auf Werker in Simulationsmodellen von logistischen Systemen.....	9
2 Ein Zugang zur formalisierten Beschreibung und Implementierung von Simulationsmodellen am Beispiel der biologischen Abwasserreinigung.	23
3 Anwendung des Simulationsmodells REGIOPLAN ⁺ auf die Region Oberengadin.....	35
4 Fuzzy-Methoden und Neuronale Netze in der Landschaftsmodellierung.....	49
5 Neuronale Netze im Umweltbereich	61
6 Einsatz unscharfer Petri-Netze zur Bilanzierung, Planung und Steuerung von Stoffströmen.	81
7 Steigerung der betrieblichen Öko Performance durch die integrierte Unternehmensmodellierung.	93
8 -exupro- zur Problematik der Bewertung heterogener Informationen am Beispiel der Umweltbewertung alternativer Produktionspläne.....	105
9 Simulationssystem und Datenbank-Anforderungen an ein Informationssystem für Umweltprobleme.....	131
10 Das integrierte Simulationsbanksystem in SAMOS.....	143
11 Methoden und Werkzeuge für die Kopplung von (Umwelt-) Simulationsmodellen und deren Integration in ein GIS.....	153
12 Die normative (Brems)Kraft der Modellbildung für eine fortschrittliche Verkehrs- und Umweltpolitik.....	165
13 Ökologische Bewertung von Gütertransporten und deren Anwendung in der Konsumgüterdistribution.....	177
14 Erfassung und Handhabung komplexer Ökologiephänomene in der Logistik.	199

15 <i>Konzept eines Modells der Verkehrsverursachung</i>	213
16 <i>Verkehrs- und Logistikmodellierung unter Umweltaspekten im Forschungsprojekt MOBILE</i>	227
17 <i>Klassifikation von Verkehrsmodellen</i>	237
18 <i>Beschreibung von Modellexperimenten in der MOBILE Script Language (MSL)</i>	247
19 <i>Teilnehmerliste</i>	261
20 <i>Informationen über den AK</i>	265
21 <i>Publikationen des AK</i>	269

**1 Abbildung von Umwelteinwirkungen auf Werker
in Simulationsmodellen von logistischen
Systemen.**

Herper, H.; Gebhardt, H.

Abbildung von Umwelteinwirkungen auf Werker in Simulationsmodellen von logistischen Systemen

Henry Herper

Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg
Institut für Simulation und Graphik

Hansjürgen Gebhardt

Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik
und Ergonomie
an der Bergischen Universität - GH Wuppertal

1 Einführung

Die Simulationstechnik ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur Gestaltung und Analyse komplexer Systeme. Sie gewinnt im Rahmen der Umstrukturierung und Modernisierung von Betrieben als Werkzeug zur Planungsunterstützung immer mehr an Bedeutung.

Simulationswerkzeuge ermöglichen dem Anwender, die Logistik von Fertigungssystemen und deren Steuerung mit einem der jeweiligen Fragestellung anpaßbarem Detailliertheitsgrad abzubilden. In den letzten Jahren wurden diese Werkzeuge vor allem mit Komponenten ausgestattet, die die Abbildung flexibler Fertigungssysteme und automatisierter Fertigungs- und Logistikabläufe unterstützen.

Auch bei steigender Automatisierung wird in vielen Bereichen der Produktionsprozeß durch Menschen dominierend beeinflusst. Dabei ist er unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Diese lassen sich grob in

- physische Belastungen (z.B. Heben und Tragen, ungünstige Körperhaltung)
- Belastungen durch die Arbeitsumgebung (z.B. Lärm, Klima)
- psychische Belastungen (z.B. kurzzyklische Tätigkeiten, hohe Verantwortung)

gliedern.

Überbelastungen können dabei zu Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit bis hin zum Ausfall von Werkern führen und damit erhebliche Kosten verursachen. Mit der Integration von Belastungsaspekten in Planungswerkzeugen kann hier ein wesentlicher Beitrag zur Prävention geleistet werden, indem bereits im Planungsprozeß bewertete Aussagen zu der zu erwartenden Belastungssituation der Werker bereitgestellt werden, die dann neben Aussagen zur Wirtschaftlichkeit bei der Planung berücksichtigt werden können.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Vorhabens EMSIG¹ (Ergonomie in MaterialflußSimulatoren InteGrieren) wurde dieser Weg am Beispiel von Simulatoren zur Abbildung von Materialflußsystemen verfolgt. Dabei konnten Möglichkeiten zur Abbildung und Bewertung von Umwelteinflüssen - hier von Einflüssen der Arbeitsumgebung -, aber auch anderen Faktoren, wie der muskulären Belastung durch die Arbeitsaufgabe, aufgezeigt werden. Das Projekt wurde vom Institut für Simulation und Graphik der Universität Magdeburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie (ASER) an der BUGH Wuppertal und dem Fraunhofer Institut für Materialfluß und Logistik Dortmund bearbeitet.

¹ Titel des Vorhabens: Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Belastung des Menschen und des Einflusses manueller Tätigkeiten im innerbetrieblichen Materialfluß; Förderkennzeichen: 01 HK 738/6

2 Analyse manueller Tätigkeiten

Der Simulation logistischer Kenngrößen stehen seitens der Arbeitswissenschaft Modelle des Menschen gegenüber, die darauf ausgerichtet sind, menschliche Reaktionen und Möglichkeiten mathematisch zu beschreiben. Diese Modelle beziehen sich u.a. auf physiologische Größen für den Einsatz im Bereich der klinischen Therapie oder zur Abschätzung physiologischer Reaktionen am Arbeitsplatz unter bestimmten Bedingungen - hier z.B. die Schweißproduktion unter heißen Klimabedingungen (/VOGT78/). Ebenso sind Modelle zu Greifräumen und zur Optimierung von Bewegungsabläufen bekannt (z.B. /LAY91/, /BACHMEIER93/). Wissensbasierte Systeme, wie z.B. Ergon Expert (/JÄGER91/) erlauben eine detaillierte Analyse und Bewertung spezieller Situationen - hier die Lastenmanipulation.

Grundlage der weiteren Betrachtungen ist ein in der Arbeitswissenschaft übliches *Person-Umwelt-Interaktionsmodell*. Zahlreiche, in verschiedenen Industriebereichen durchgeführte Felduntersuchungen hatten und haben das Ziel, für die jeweils untersuchten Arbeitsplätze eine umfassende Beschreibung der Belastungs- und Beanspruchungssituation zu liefern, Belastungsschwerpunkte zu identifizieren und die Grundlagen für die Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten bereitzustellen. Damit besteht eine empirisch erfasste Datenbasis, die in Simulationsmodellen für die Abschätzung der Belastungssituation genutzt werden kann. Das den Erhebungen zugrundeliegende Methodeninventar wiederum kann für die Erweiterung und Anpassung der Datenbasis an spezifische Situationen eingesetzt werden.

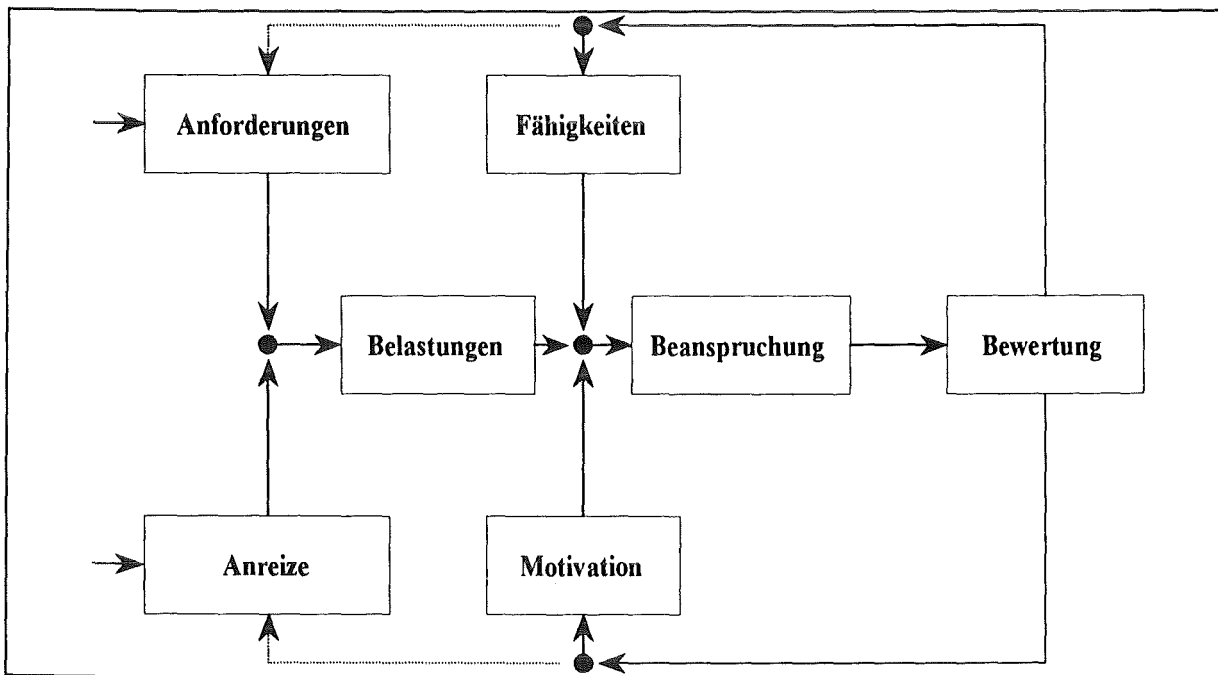


Bild 1: Person-Umwelt-Modell (/PETERS86/)

Die durch das Interaktions-Modell beschriebene Wechselwirkung zwischen Person und Umwelt ist in Bild 1 dargestellt. Dem Modell kommt dabei die Aufgabe zu, eine gemeinsame Ausgangsbasis und eine Abgrenzung des Problems bzw. eine Definition des betrachteten Teilsystems bereitzustellen. Wesentlich dabei ist die resultierende Bewertung, da Belastungen z.B. durch Umwelteinflüsse als solche zunächst wert-neutral sind. Erst mit der Berücksichtigung der übrigen Faktoren können bewertete Aussagen im Sinne von

unkritisch - grenzwertig - kritisch

abgeleitet werden.

Kennzeichnend für die Belastung bei den im Rahmen des Vorhabens betrachteten überwiegend manuellen Tätigkeiten sind einerseits die muskulären Anforderungen, die aus der Arbeitsaufgabe resultieren, andererseits können mögliche Überlastungen durch die Arbeitsumgebung bzw. durch Umwelteinflüsse - hier insbesondere Lärm, Schwingungen sowie klimatische Einflüsse - hervorgerufen werden. In Bild 2 sind die im Werkzeug EMSIG berücksichtigten Belastungsmerkmale zusammengestellt.

1 Belastungen durch die Arbeitsaufgabe
1.1 Dynamische Muskelarbeit
1.2 Statische Muskelarbeit
1.2.1 Haltearbeit
1.2.2 Haltungsarbeit
1.2.3 Lastenmanipulation
2 Belastungen durch die Arbeitsumgebung (Umwelteinflüsse)
2.1 Lärm
2.2 Vibrationen
2.3 Klima
2.3.1 Temperatur
2.3.2 Wärmestrahlung

Bild 2: Ausgewählte Merkmale

Die Abbildung der Belastung erfolgt zweckmäßig auf der Grundlage von Arbeitsvorgängen, da diese insbesondere für Simulationsanwendungen gegenüber der traditionellen arbeitsplatzbezogenen Datenerhebung und -aufbereitung entscheidende Vorteile aufweisen.

Mit der Aneinanderreihung von Arbeitsvorgängen entsprechend einem gegebenen oder simulierten Arbeitsablauf bildet sich je Belastungsmerkmal ein Zeitprofil heraus, das hinsichtlich Grenzwert-Überschreitungen analysiert werden kann, wodurch sich dann arbeitsplatzbezogene Aussagen ableiten lassen.

Als Bewertungsvorschrift für die Umwelteinflüsse ebenso wie für die anderen berücksichtigten Belastungsfaktoren wird eine einheitliche 7-stufige Skala (/MÜLLER81/) eingesetzt, die bereits in umfangreichen arbeitswissenschaftlichen Felduntersuchungen in verschiedenen Industriebereichen Anwendung fand. Mit der Ausrichtung auf die Dauerleistungsgrenze ist das Bewertungsverfahren dabei an dem Grenzkriterium „Erträglichkeit“ orientiert.

Bild 3 zeigt die verbalisierte Beschreibung der Stufen und den hierzu korrespondierenden Grad der Erfordernis betrieblicher Maßnahmen, jeweils bezogen auf die Ergebnisse einer ganzschichtigen Betrachtung.

Belastungsintensität		Bewertungsstufe	Betriebl. Maßnahmen
Überbelastung	sehrwahrscheinlich	VII	erforderlich
	wahrscheinlich	VI	dringend empfohlen
	möglich	V	empfohlen
Grenzbereich		IV	Möglichkeiten überprüfen
belastend		III	
gering belastend		II	
sehr gering belastend		I	

Bild 3: *Bewertungsverfahren für Belastung und Beanspruchung nach /MÜLLER81/
- Zuordnung der Erfordernis betrieblicher Maßnahmen*

Ausgehend von einer Stufe 4, die in den Fällen, in denen objektivierbare Meßdaten vorliegen, den jeweiligen Grenzwert zulässiger Dauerbelastung einschließt und die Situation als "stark belastend" ausweist, wird der weniger belastende Bereich durch die Stufen 3 ("belastend") bis hin zur Stufe 1 ("sehr gering belastend") und der stärker belastende Bereich durch die Stufen 5 ("Überbelastung möglich") bis hin zur einseitig offenen Stufe 7, bei der eine Überbelastung sehr wahrscheinlich ist, abgedeckt.

Im folgenden Abschnitt werden die im Modell berücksichtigten Umwelteinflüsse Lärm, Vibration und Klima erläutert. Dabei werden jeweils ausgehend von Meßgrößen Bewertungsgrößen beschrieben und Stufengrenzen gemäß dem o.a. Bewertungsverfahren zugeordnet.

Lärm

Als Lärm wird Schall bezeichnet, der das Gehör schädigen kann oder als störend und belästigend empfunden wird. Die Belastung durch Lärm stellt in vielen Betrieben ein Problem dar, da in nahezu allen Betrieben Bereiche existieren, in denen die als zulässig erkannten Grenzkriterien überschritten werden.

Die Belastungsintensität ist u.a. abhängig von dem Schalldruck und der Frequenz der Schwingungen. Als Kenngröße zur Bewertung der Wirkung von Schall wird üblicherweise der sogenannte A-bewertete Schalldruckpegel - ausgedrückt in dB(A) - verwendet. Dabei wird der Schalldruck auf einen in etwa der Hörschwelle entsprechenden Bezugsschalldruck normiert. Die Kenngröße faßt die Einflußgrößen zu einem gemeinsamen Kennwert zusammen, indem Schallpegel gleicher Wahrnehmung durch die gleiche Maßzahl ausgedrückt werden.

Die Messung erfolgt in der Regel ortsbezogen. Eine Umrechnung in eine personenbezogene Größe, die letztlich die Belastungsintensität widerspiegelt, erfolgt durch Verrechnung unter Einbeziehung der ermittelten oder simulierten Aufenthaltswahrscheinlichkeit.

Für Prognose- bzw. Simulationsanwendungen ergibt sich hieraus das Problem von einer Ist-Situation auf eine, z.B. nach durchgeführten Umgestaltungsmaßnahmen, zu erwartende Sollsituation zu schließen. Hier kann nur auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Zusätzlich können Prognoseverfahren zur Vorausberechnung von Halleninnenpegeln (z.B. /NEUGEBAUER92/) eingesetzt werden.

Ein Kennwert, bezogen auf einen Ablaufabschnitt, ergibt sich durch eine zeitgewichtete, energieäquivalente Mittelwertbildung über alle beteiligten Arbeitsvorgänge gemäß Gl. (1):

$$L = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N (10^{0,1 \cdot L_i} \cdot t_i) \right] \quad \text{Gl. (1)}$$

mit L : ablaufabschnittbezogener Schalldruckpegel in dB(A)
 L_i : Schalldruckpegel während des i-ten Vorgangs in dB(A)
 t_i : Ausführungsdauer des i-ten Arbeitsvorganges
 T : $= \sum t_i =$ Dauer des Ablaufabschnittes

Belastungsintensität	Bewertungsstufe	Beurteilungspegel L_{eq} in dB(A)	
Über- belastung	sehr wahrscheinlich	VII	$L_{eq} > 95$
	wahrscheinlich	VI	$90 < L_{eq} \leq 95$
	möglich	V	$85 < L_{eq} \leq 90$
Grenzbereich		IV	$80 < L_{eq} \leq 85$
belastend		III	$75 < L_{eq} \leq 80$
gering belastend		II	$65 < L_{eq} \leq 75$
sehr gering belastend		I	$L_{eq} \leq 65$

Bild 4: Bewertungsstufen für den äquivalenten Schalldruckpegel L_{eq} für Industriearbeit nach ASER

Bild 4 zeigt die Stufenbereiche für die Belastung durch Lärm anhand des äquivalenten Schalldruckpegels L_{eq} . Grundlage bildet der energieäquivalente Schichtmittelwert bezogen auf eine 8h-Schicht.

Sofern bei der Arbeit Gehörschutz getragen wird, kann dieser durch Subtraktion der hierdurch erzielbaren Dämpfung (in dB) berücksichtigt werden.

Vibrationen

Vibrationen stellen mechanische Schwingungen dar, die über vibrationsempfindliche Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und der Haut wahrgenommen werden. Je nach Einleitungsart wird zwischen Ganzkörperschwingungen (z.B. beim Führen eines Fahrzeuges) und Teilkörperschwingungen (z.B. bei Arbeiten mit handgeführten Maschinen über das Hand-Arm-System) unterschieden.

Die Belastungsintensität ist abhängig von

- der Schwingbeschleunigung und der Frequenz
 - der Schwingungsrichtung relativ zu den Körperachsen des Menschen
- sowie der
- Einleitungsart

Als Kenngröße zur Bewertung der Wirkung mechanischer Schwingungen wird die bewertete Schwingstärke verwendet, die über den sogenannten K-Wert beschrieben wird.

Dieser faßt die o.a. Einflußgrößen zu einem gemeinsamen Kennwert zusammen, indem Schwingstärken gleicher Wahrnehmung durch den gleichen K-Wert ausgedrückt werden.

Ein Kennwert bezogen auf einen Ablaufabschnitt ergibt sich durch zeitgewichtete Effektivwertbildung über alle beteiligten Arbeitsvorgänge gemäß Gl. (2):

$$K_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N (K_{eq,i}^2 \cdot t_i)} \quad \text{Gl. (2)}$$

mit K_{eq} : ablaufabschnittbezogener Kennwert (äquiv. Schwingstärke)

$K_{eq,i}$: ermittelter K-Wert des i-ten Arbeitsvorgangs

t_i : Ausführungsdauer des i-ten Arbeitsvorgangs

T : = $\sum t_i$ = Dauer des Ablaufabschnittes

Bild 5 zeigt die Stufenbereiche für die Bewertung der Vibrationsbelastung. Grundlage bildet der Effektivwert der äquivalenten Schwingstärke K_{eq} über eine 8h-Schicht.

Belastungsintensität		Bewertungsstufe	Mech. Schwingungen K-Wert K_{eq}
Über- belastung	sehr wahrscheinlich	VII	$K_{eq} > 40$
	wahrscheinlich	VI	$25 < K_{eq} \leq 40$
	möglich	V	$16 < K_{eq} \leq 25$
Grenzbereich		IV	$10 < K_{eq} \leq 16$
belastend		III	$6 < K_{eq} \leq 10$
gering belastend		II	$4 < K_{eq} \leq 6$
sehr gering belastend		I	$K_{eq} \leq 4$

Bild 5: *Bewertungsstufen für die Vibrationsbelastung*

Klima

Der menschliche Körper benötigt für eine gute Funktionsfähigkeit ein Gleichgewicht von aufgenommener, produzierter und abgegebener Wärme. Eine Belastung durch Klima ist dann gegeben, wenn diese ausgeglichene Wärmebilanz nicht erreicht werden kann oder eine thermoregulatorische Anpassung erfolgt. Für den hier betrachteten Warmbereich stellt die einsetzende Schweißproduktion den thermoregulatorischen Anpassungsprozeß dar. Kann durch die Schweißverdunstung keine ausreichende Kühlung erreicht werden so kommt es zu einem Anstieg der Körpertemperatur mit der Gefahr eines Hitzschlages.

Eine Klimasituation ist dabei durch die Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Wärmestrahlung physikalisch beschreibbar. Die Belastung, der ein Mensch in einem warmen Umgebungsklima ausgesetzt ist, wird darüber hinaus durch die zeitgleich

auftretende innere Wärmeproduktion sowie durch die Eigenschaften der getragenen Bekleidung, hier insbesondere deren Wärmedämmung, wesentlich beeinflusst.

Innerhalb des hier eingesetzten Bewertungsverfahrens wird das Zusammenwirken von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit durch die sogenannte Normal-Effektivtemperatur (NET) beschrieben. Das Attribut "Normal" bezieht sich hier auf den (normal) bekleideten Menschen. Der Grad der Belastung durch Wärmestrahlung wird gesondert betrachtet. Dies vor dem Hintergrund, daß mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der Klimabelastung sich in beiden Fällen grundlegend unterscheiden. Kann eine zu hohe Temperatur oder eine zu hohe Luftfeuchte häufig nur durch aufwendige technische Maßnahmen (Kühlung) reduziert werden, kann die Wärmestrahlung unmittelbar auf eine Quelle (heiße Oberfläche, offene Flamme) zurückgeführt werden. Maßnahmen können z.B. auf geeignete Abschirmungen an der Quelle reduziert werden.

Zur vorgangsbezogenen Beschreibung einer Klimasituation ist die Kenntnis der Klimagrundgrößen

- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- Wärmestrahlung

erforderlich, wobei üblicherweise die Wärmestrahlung durch die Effektive Bestrahlungsstärke (E_{eff}) angegeben wird. Die Bezeichnung "Effektiv" bezieht sich hier auf den Strahlungsaustausch des Menschen mit der Umgebung, wobei die Oberflächentemperatur mit einheitlich 32° C angenommen wird. Die Berücksichtigung ist nur dann erforderlich, wenn entsprechende Strahlungsquellen vorhanden bzw. zu erwarten sind und eine zusätzliche Belastung darstellen.

		Arbeitsenergieumsatz		Effektivtemperatur							Effektive Bestrahlungsstärke
		AU [kJ/min]		NET [°C]							E_{eff} [W/m ²]
Überbelastung	sehr wahrscheinlich	VII	AU > 25	40	36	33	30	28	26	25	$E_{\text{eff}} > 300$
	wahrscheinlich	VI	23 < AU ≤ 25	37	33	29	26	23	21	19	260 < E_{eff} ≤ 300
	möglich	V	20 < AU ≤ 23	33	31	27	23	19	15	11	220 < E_{eff} ≤ 260
Grenzbereich		IV	16 < AU ≤ 20	31	29	25	21	17	13	9	180 < E_{eff} ≤ 220
belastend		III	12 < AU ≤ 16	25	22	19	16	14	11	8	95 < E_{eff} ≤ 160
gering belastend		II	8 < AU ≤ 12	19	17	15	13	11	9	7	35 < E_{eff} ≤ 95
sehr gering belastend		I	AU ≤ 8								$E_{\text{eff}} \leq 35$
				I	II	III	IV	V	VI	VII	
				Stufe Arbeitsenergieumsatz							

Bild 6: Bewertungsstufen für den die Belastung durch klimatische Einflüsse nach ASER

Die Wärmeentwicklung innerhalb des Körpers ist dabei über den sogenannten

- Arbeitsenergieumsatz
- beschreibbar.

Ein Kennwert bezogen auf einen Ablaufabschnitt ergibt sich durch zeitgewichtete Mittelwertbildung über die beteiligten Arbeitsvorgänge. Dabei sollte die Normal-Effektivtemperatur innerhalb des Ablaufabschnittes keinen extremen Schwankungen unterliegen.

Bild 6 zeigt Stufenbereiche für die Belastung durch warme Umgebungsbedingungen. Die Bewertung der Normal-Effektivtemperatur erfolgt in Abhängigkeit von der Arbeitsschwere - ausgedrückt durch den Arbeitsenergieumsatz. Die Effektive Bestrahlungsstärke als Meßgröße der Wärmestrahlung kann dabei direkt zugeordnet werden.

3 Integration von Belastungsfaktoren in Simulationsmodelle

Eine Voraussetzung zur Erweiterung von Materialflußsimulatoren zur Berücksichtigung der Umwelteinwirkungen auf Werker ist die Erfassung, Speicherung und Aufbereitung entsprechender Eingangsgrößen für Simulatoren. Dazu wurde im Rahmen des Projektes EMSIG (Ergonomie in MaterialflußSimulatoren InteGrieren) ein eigenständiger Softwaremodul entwickelt. Diese Komponente wird als *Tätigkeitskonstruktor* bezeichnet. Er stellt ein Werkzeug dar, mit dem ein Anwender in die Lage versetzt wird, die im Materialflußsystem auftretenden und für die Simulation im Modell abgebildeten Arbeitsvorgänge unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Belastungsdaten zu beschreiben. Dabei sind Tätigkeiten z.B. durch das zeitgleiche Aufeinandertreffen eines zu bearbeitenden Werkstückes an einer bestimmten Bearbeitungsstation im Simulationsmodell beschreibbar.

Für diese Tätigkeiten sind die relevanten Belastungsgrößen entweder durch empirische Untersuchungen oder anhand bereits gespeicherter Daten zu ähnlichen Arbeitsaufgaben zu ermitteln. Der „Tätigkeitskonstruktor“ ist daher so konzipiert, daß sowohl neue Daten erfaßt und verwaltet werden können als auch auf gespeicherte Daten zurückgegriffen werden kann.

Die Grundlage dafür ist die Zerlegung aller im System ablaufenden Tätigkeiten in Arbeitsteilvorgänge. Ein *Arbeitsteilvorgang* stellt dabei einen Teil eines Arbeitsablaufes dar, der weder bei seiner Beschreibung noch bei seiner zeitlichen Erfassung weiter unterteilt wird. Für jeden Teilvorgang müssen die Belastungsfaktoren zur Verfügung gestellt werden.

Stehen für die nachzubildenden Arbeitsteilvorgänge entsprechende, empirisch erfaßte Daten in einer Referenzdatenbank zur Verfügung, so können sie für die Zusammenstellung der Arbeitsvorgänge genutzt werden. Werden Datensätze für Arbeitsteilvorgänge benötigt, die noch nicht in der Referenzdatenbank gespeichert sind, so hat der Nutzer die Möglichkeit, die benötigten Daten interaktiv am Tätigkeitskonstruktor zu erfassen. Dazu werden entsprechende Eingabemasken angeboten.

Die Arbeitsvorgänge werden durch den Anwender interaktiv aus den Arbeitsteilvorgängen zusammengesetzt. Ein *Arbeitsvorgang* stellt dabei eine Folge von Einzeltätigkeiten (*Arbeitsteilvorgänge*) dar, die für die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe miteinander verknüpft sind /MÜLLER91/. Für das Simulationsmodell muß ein Arbeitsvorgang durch einen oder mehrere Werker ohne Unterbrechung ausgeführt werden. Dabei werden die Arbeitsteilvorgänge mit Kennziffern der zu erwartenden Belastung sowie einer Prozentzahl, die den Anteil an der Gesamttätigkeit ausdrückt, belegt.

Die so ermittelten Werte werden in die Datei „Benötigte Arbeitsvorgänge“ eingetragen und für die Auswertung der Simulationsexperimente zur Verfügung gestellt.

Die Parameter eines Arbeitsvorganges berechnen sich aus den entsprechenden Parametern seiner Teilvorgänge. Das geschieht automatisch, nachdem der Arbeitsvorgang definiert wurde, und betrifft in der aktuellen Fassung folgende Größen (s.a Abschnitt 2):

Vorgang:

- Dauer [min] : Summenbildung

Muskuläre Arbeit:

- Arbeitsenergieumsatz [kJ/min] : linearer Mittelwert
- Arbeitspulsfrequenz [1/min] : linearer Mittelwert
- statische Belastung [dimensionslos] : linearer Mittelwert
- Körperhaltung [dimensionslos] : dominante Körperhaltung
- Rohlingsgewicht [kg] : Maximalwert
- Hebevorgänge [dimensionslos] : Summenbildung

Umgebungsfaktoren:

- Schallpegel [db (A)] : logarithmischer Mittelwert
- Vibration [dimensionslos] : quadratischer Mittelwert
- Normal-Effektivtemperatur [° C] : linearer Mittelwert
- Wärmestrahlung [W/m²] : linearer Mittelwert
- Beleuchtungsstärke [lux] : linearer Mittelwert

Für die angegebenen Berechnungsvorschriften gilt: Die Mittelwertbildung erfolgt gewichtet entsprechend der prozentualen Zeitanteile der Teilvorgänge am Arbeitsvorgang.

Dabei ist die Liste naturgemäß nicht vollständig, die Vorgehensweise kann jedoch verdeutlicht werden, so daß weitere Faktoren in gleicher Weise integriert werden können.

In einem Folgeschritt werden Belastungsfaktoren, die unmittelbaren Einfluß auf das Herz-Kreislaufsystem haben, zu einer Kennzahl der physischen Gesamtbelastung zusammengefaßt. Hierzu wurde auf der Grundlage einer Regressionsanalyse folgende Näherungsformel abgeleitet:

$$B e l = 1.705 A U + 1.0 E T M + 0.05 W S M + 8.4 S B$$

- B e l - Kennzahl der physischen Gesamtbelastung [W]
- A U - Arbeitsenergieumsatz [k J/m i n]
- E T M - personenbezogene Effektivtemperatur [C]
- W S M - personenbezogene effektive Bestrahlungsstärke [W/m²]
- S B - statisch-muskuläre Belastung (Schätzung aufgrund 7-stufiger Skala)

Daran schließt sich die Berechnung der Belastungsgrößen des gesamten Vorganges nach folgenden Formeln an:

$$\text{Arbeitsumsatz} = \left(\frac{1}{t_{\text{ges}}} \right) * \sum_{i=1}^n (t_i * x_i) \quad x_i = \text{Arbeitsumsatz des } i\text{-ten ATV}$$

$$\text{Vibration} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ges}}} * \sum_{i=1}^n (t_i * x_i^2)} \quad x_i = \text{Vibration des } i\text{-ten ATV}$$

$$\text{Schall} = \left(\frac{10}{t_{\text{ges}}} \right) * \log \sum_{i=1}^n (t_i * 10^{x_i/10}) \quad x_i = \text{Schall des } i\text{-ten ATV}$$

n = Anzahl der Arbeitsteilvorgänge (ATV) pro Arbeitsvorgang (AV)

t_i = Zeitdauer des i-ten ATV (i = 1 ... n)

t_{ges} = Zeitdauer des AV

Die angegebene Formel zur Berechnung des Arbeitsumsatzes steht stellvertretend für alle Belastungsgrößen, die durch eine lineare Mittelwertbildung berechnet werden.

Die für jeden Arbeitsvorgang so berechneten Werte können vom Simulationsmodell genutzt werden. Voraussetzung dafür ist, daß jeder Arbeitsvorgang einzeln nachgebildet wird und exakt einem Werker zugeordnet werden kann. Dabei sind zwei Stufen der Integration möglich. In der ersten Stufe werden aus den vom Materialflußsimulator bestimmten Werkerprotokollen, die den jeweiligen Arbeitsablauf detailliert abbilden, im Rahmen einer post-run-Auswertung für jeden Werker Zeitreihen bestimmt, die den Verlauf der berücksichtigten Größen über der Schichtzeit wiedergeben. In einer zweiten Stufe werden die aktuellen Daten zur Belastungssituation für jeden Werker parallel zur Simulation berechnet und stehen der Disposition des Simulators zur erweiterten Entscheidungsfindung zur Verfügung. Der strukturelle Aufbau des Grundmoduls zur post-run-Auswertung ist in Bild 7 dargestellt.

Nach der Berechnung der Kenngrößen der Belastung/Beanspruchung für die einzelnen Arbeitsvorgänge und der Zuordnung dieser Vorgänge zu Maschinen und bearbeiteten Teilen, ist es erforderlich, diese Daten mit den Simulationsresultaten zu verknüpfen.

Dazu wurde die Komponente *Vorgangszuordnung* entwickelt. Sie hat die Aufgabe, entsprechend der Trace-Daten eines Simulators eine standardisierte Beschreibung der ausgeführten Arbeitsvorgänge zu erstellen. Diese Resultatdaten werden für jeden Werker in einer Datei gespeichert und für die weitere Verarbeitung durch die Auswertungskomponente bereitgestellt.

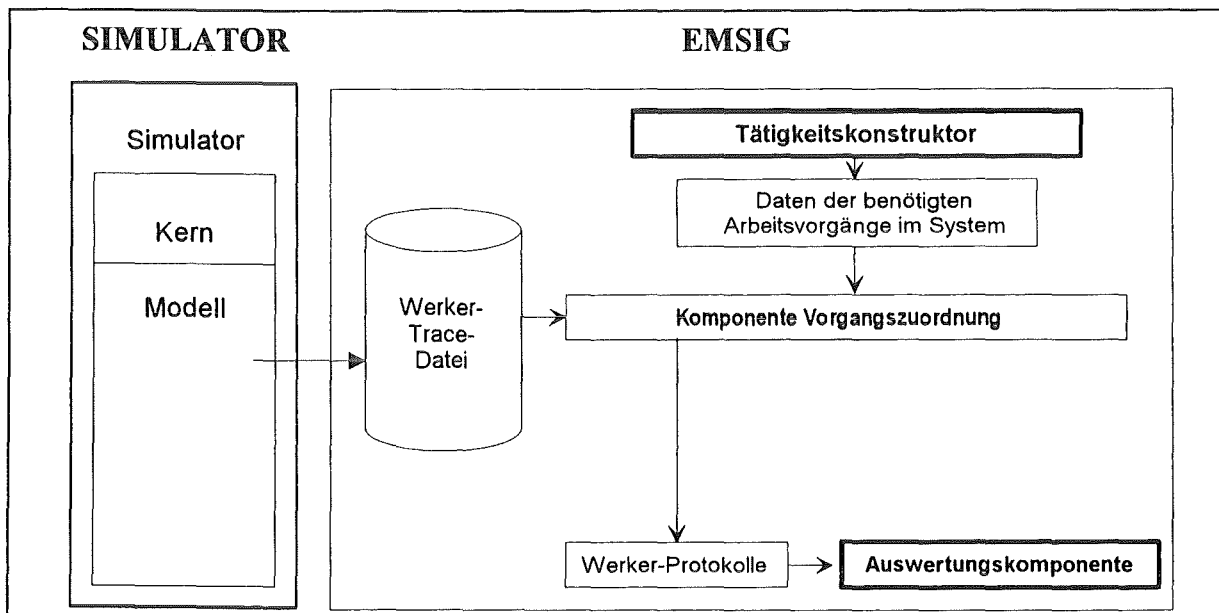


Bild 7: Struktureller Aufbau des Grundmoduls

4 Bewertung von Simulationsresultaten

An die Aufbereitung der Simulationsresultate besteht einerseits die Anforderung, daß sie dem Anwender einen schnellen Überblick geben, andererseits sich detailliertere Informationen abrufen lassen. Hauptzielgruppen dabei sind Materialflußplaner und Arbeitsplaner.

Im Sinne eines Überblickes kann daher eine matrixförmige Darstellung erstellt werden, die - bezogen auf eine ausgewählte Schicht - jedem im Modell abgebildeten Werker ein bewertetes Belastungsprofil zuordnet. Dieses zeigt für die berücksichtigten Belastungsmerkmale, ob die jeweilige Belastung aus arbeitswissenschaftlicher Sicht als wahrscheinlich unkritisch, grenzwertig oder kritisch einzustufen ist. Ein Beispiel für die Darstellung der Resultatdaten ist in Bild 8 wiedergegeben.

Grundlage hierzu bilden die aus dem simulierten Arbeitsablauf abgeleiteten mittleren Belastungsintensitäten sowie das in Abschnitt 2 vorgestellte 7-stufige Bewertungsverfahren, wobei im Sinne eines Überblicks die Stufen 1-3 zu einer Bewertung „unkritisch“, die Stufen 5-7 zu einer Bewertung „kritisch“ zusammengefaßt wurden.

Auf einer Detaillierungsebene können für jeden Werker die Arbeitsablaufinformationen sowie die korrespondierenden Belastungsprofile in einer Zeitreihendarstellung abgerufen werden, anhand derer Ursachen für grenzwert-überschreitende Bewertungen sowie Spitzenbelastungen ermittelt werden können. Die Darstellung entspricht dabei der bei arbeitswissenschaftlichenn Feldstudien üblichen Darstellungsform.

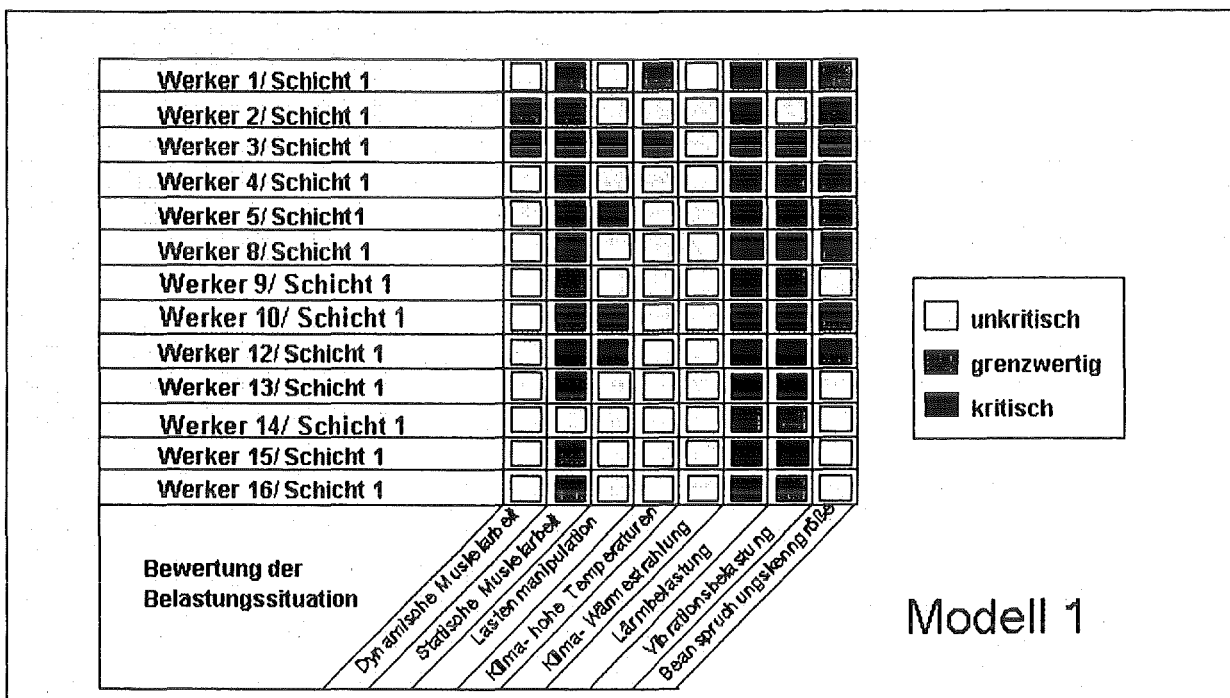


Bild 8: Übersichtsdarstellung zur Belastungssituation der Werker als zusätzliches Ergebnis eines Simulationsexperimentes

Neben der werkerbezogenen Betrachtung erlaubt die in Bild 8 beispielhaft wiedergegebene Darstellungsform in vertikaler Richtung gelesene Aussagen zu Schwerpunktbelastungen bei den betrachteten Arbeitssystemen. Für das Beispiel bedeutet dies bei Betrachtung der Umgebungsbelastungen deutliche Ausprägungen bei den Merkmalen „Lärm“ und „Vibration“, die nahezu durchgängig als „grenzwertig“ bis „kritisch“ bewertet wurden, die Belastung durch klimatische Einflüsse hingegen ist nahezu durchgängig als „unkritisch“ zu bewerten.

5 Schlußbetrachtungen

Mit den aufgezeigten, zusätzlichen Resultatdaten kann ein Beitrag geleistet werden, die Arbeitsbedingungen in der Planungsphase präventiv zu verbessern. Geeignete Maßnahmen können am Modell untersucht und ihre Auswirkungen abgeschätzt werden.

Unter dem Gesichtspunkt der arbeitsbedingter Belastungen dargestellt, konnte eine Vorgehensweise aufgezeigt werden, Umwelteinflüsse in die Planung von Materialflusssystemen zu integrieren. Dabei werden die Umweltdaten Arbeitsvorgängen zugeordnet, die sich i.d.R. aus Systemzuständen der Modellkomponenten ableiten lassen. Das implementierte Bewertungsver-

fahren ermöglicht eine sofortige Bewertung und einfache Interpretation der Ergebnisse. Hiermit kann ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Nutzerakzeptanz erreicht werden.

Naturgemäß erfordert die Integration zusätzlichen Aufwand bei der Gewinnung der Eingabedaten und bei der Modellerstellung, da ein hoher Detailliertheitsgrad erforderlich ist. Dieser zusätzliche Aufwand gestattet jedoch Planungsergebnisse auf eine breitere Grundlage zu stellen und Systeme - hier Materialflußsysteme - bereits in Planungsphase ganzheitlicher zu betrachten und zu Wechselwirkungen zu analysieren.

6 Literatur

- /BACHMEIER93/ Praxiserfahrungen mit rechnergestützter Arbeitsplatzgestaltung
REFA-Nachrichten 2/1993, S. 15ff.
- /JÄGER91/ Jaeger, M.; Hecktor, K.
Ergon Expert - ein wissensbasiertes System zur Analyse und Gestaltung
von Lastenmanipulationen
Z.Arb.wiss. 45 (1991), S. 216ff.
- /LAY91/ Lay, K.; Merges, R.
Arbeitsplatzgestaltung in der Montage rationalisieren
in: AV Heft 5, Hanser, München, 1991, S. 179 - 183
- /LORENZ95/ Lorenz, Peter et al.
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Modells
zur Beschreibung der Belastung des Menschen und des Einflusses ma-
nueller Tätigkeiten im innerbetrieblichen Materialfluß“
Magdeburg, 1995
- /MÜLLER81/ Müller, B.H.; Hettinger, Th.
Interpretations- und Bewertungsverfahren arbeitswissenschaftlich-ergo-
nomischer Felddaten
Z.Arb.wiss. 35 (1981), S. 82ff.
- /MÜLLER91/ Müller, B.H.
Vorgangsbezogene Analyse und Bewertung von Arbeitssituationen
Z.Arb.wiss. 45 (1991), S. 129ff.
- /NEUGEBAUER92/ Neugebauer, G.
Vorausrechnung von Halleninnenpegeln und Lärminderungspro-
gramm
in: Die BG 02/92 (1992), S. 93-96
- /PETERS86/ Peters, H.
Untersuchungen zur Auswirkung der kombinierten Belastung aus dy-
namischer Muskularbeit und Hitzeklima auf die Beanspruchungsreak-
tion
Dissertation, Wuppertal 1986
- /VOGT78/ Vogt, J.-J.; Candas, V.; Libert, J.P.; Hoefft, A.
Die erforderliche Schweißabgabe als Index der Wärmebelastung
Z.Arb.wiss. 32 (1978), S. 241ff.



2 Ein Zugang zur formalisierten Beschreibung und Implementierung von Simulationsmodellen am Beispiel der biologischen Abwasserreinigung.

Alex, J.; Jumar, U.

Ein Zugang zur formalisierten Beschreibung und Implementierung von Simulationsmodellen am Beispiel der biologischen Abwasserreinigung

J. Alex, U. Jumar

ifak
Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Steinfeldstraße 3 (IGZ)
Tel.: 03 92 03/ 8 10 20
Fax: 03 92 03/ 8 11 00

15. Februar 1996

1 Motivation

Unter dem Aspekt der praktischen Nutzung sind mathematische Modelle umwelttechnischer Prozesse sowohl im Stadium der Planung und Auslegung von Anlagen als auch für den laufenden Betrieb bedeutsam. Als Grundlage einer dynamischen Simulation helfen Modelle bei der Entwicklung geeigneter verfahrenstechnischer Varianten, dem Entwurf intelligenter Steuerungs- und Regelungssysteme und der Anlagenoptimierung im weitesten Sinne. In ihrer Ausprägung als on-line Modelle eröffnen sie weitere praxisrelevante Anwendungen: die Unterstützung einer flexiblen Betriebsführung unter Verwendung situationsbezogener Prognoseinformationen oder die modellbasierte Berechnung meßtechnisch schwer oder gar nicht zugänglicher wichtiger Prozeßgrößen.

Bei der biologischen Abwasserreinigung weit verbreitet ist das Belebtschlammverfahren. Obwohl es sich bei den entsprechenden Kläranlagen um komplexe verfahrenstechnische Anlagen handelt, ist der wissenschaftliche Stand der Modellbildung für den zentralen Teil des Klärwerks, die biologische Reinigung, vergleichsweise günstig. Anders als auf den meisten Gebieten der Prozeßtechnik, wurde mit den Arbeiten der IAWQ (International Association on Water Quality) erfolgreich versucht, durch eine spezielle Matrix-Notation für die Modellbeschreibung einen geeigneten „Standard-Rahmen“ der Modellbildung zu schaffen. Die Spezifika der beschriebenen Prozesse lassen dies zu, und es hat sich herausgestellt, daß ein solcher formalisierter Ansatz ganz wesentlich zur Verbreitung und Akzeptanz der Modelle einerseits und zum Schaffen einer einheitlichen wissenschaftlichen Verständigungsbasis andererseits beiträgt. Dies hat die eigene Arbeit der Autoren auf der Suche nach Wegen zur möglichst effizienten Implementierung von Modellen stimuliert.

Die von verschiedenen wissenschaftlichen Schulen international vorangetriebene stürmische Entwicklung neuer Modelle zur biologischen Abwasserreinigung erfordert eine geeignete Methodik, um von neuen theoretischen Modellansätzen aufwandsarm und fehlerfrei zu einer Modellimplementierung zu gelangen. Aus Sicht der Modellentwicklung, aber auch der Nutzer der Modelle, sollen das Prozeß- und Modellverständnis gegenüber softwaretechnischen Fragen Vorrang haben. Vorliegender Beitrag beschreibt anhand des Beispiels der Modellierung und Simulation von Kläranlagen eine Vorgehensweise, die der letztgenannten Zielsetzung nahe kommt.

2 Die Belebtschlammmodelle ASM 1 und ASM 2 im Überblick

Der Stand der Analyse und Modellbildung der Prozesse der biologischen Abwasserreinigung wird wesentlich durch die beiden Modelle „Activated Sludge No. 1“ [HEN 87] und „Activated Sludge No. 2“ [HEN 94] geprägt. Das Modell „Activated Sludge No. 1“ (ASM 1) beschreibt insbesondere den Abbau organischer Stoffe (ausgedrückt durch den CSB = chemischer Sauerstoffbedarf) und die Stickstoffelimination (Nitrifikation, Denitrifikation) des Belebtschlammes in einem volldurchmischten Bilanzraum (Rührkesselreaktor). Das Modell unterscheidet zwei Gruppen von Mikroorganismen - die autotrophe und die heterotrophe Biomasse - und bilanziert weitere elf für die biologische Reinigung relevante Stoffgruppen, die durch Konzentrationen beschrieben sind. Einige Stoffgruppen definieren sich nur durch ihre Rolle bei den im Belebtschlamm ablaufenden biologischen Vorgängen. Sie werden als Summenparameter zur Charakterisierung vieler gelöster bzw. partikulärer Einzelstoffe verwendet und werden in äquivalentem chemischen Sauerstoffbedarf je Volumeneinheit [$\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3$] gerechnet. Die berücksichtigten Stoffgruppen sind:

S_I	Biologisch inerte, gelöste organische Stoffe	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
S_S	Biologisch rasch abbaubare, gelöste organische Stoffe (Substrat)	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
X_I	Biologisch inerte, partikuläre organische Stoffe	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
X_S	Biologisch langsam abbaubare organische Stoffe	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
X_{BH}	Aktive heterotrophe Biomasse	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
X_{BA}	Aktive autotrophe Biomasse	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
X_P	Partikuläre Zerfallsprodukte der Biomasse	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
S_O	Sauerstoff	$[\text{g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3]$
S_{NO}	Nitrat- und Nitrit-Stickstoff	$[\text{g}_N/\text{m}^3]$
S_{NH}	NH_4^+ und NH_3 Stickstoff	$[\text{g}_N/\text{m}^3]$
S_{ND}	Biologisch abbaubarer, gelöster organisch gebundener Stickstoff	$[\text{g}_N/\text{m}^3]$
X_{ND}	Biologisch abbaubarer, partikulärer organisch gebundener Stickstoff	$[\text{g}_N/\text{m}^3]$
S_{ALK}	Alkalinität	$[\text{mol}/\text{m}^3]$

Die Konzentrationen werden durch acht biochemische Umwandlungsprozesse beeinflusst:

- Aerobes Wachstum heterotropher Biomasse
- Anoxisches Wachstum heterotropher Biomasse (Denitrifikation)
- Aerobes Wachstum autotropher Biomasse (Nitrifikation)
- Ammonifikation
- Abbau heterotropher Biomasse
- Abbau autotropher Biomasse
- Hydrolyse partikulärer organischer Verbindungen
- Hydrolyse der Stickstoffverbindungen

Zusätzlich zu den Stoffgruppen und Reaktionen des Modellansatzes ASM 1 werden im ASM 2 die Prozesse der chemischen und biologischen Phosphorelimination modelliert. Das im Abwasser gelöste Phosphat kann nur durch eine chemische Fällung oder durch Einlagerung in die Biomasse gebunden und mit dem Schlamm aus dem Abwasser entfernt werden. Als neue Gruppe der Mikro-

organismen des Belebtschlammes werden hier die phosphorakkumulierenden Organismen PAOs (Phosphorus Accumulating Organisms) mit ihren zellinternen Speicherprodukten Polyphosphate X_{PP} bzw. den organischen Reservestoffen X_{PHA} (Poly-hydroxy-alkanoate) bilanziert. Eine Liste der insgesamt 19 biochemischen Umwandlungsprozesse soll hier nicht angeführt, sondern vielmehr das Augenmerk auf die an einem einfachen Beispiel gezeigte formalisierte Prozeßbeschreibung gelenkt werden.

3 Formalisierte Prozeßbeschreibung

3.1 Biologische und chemische Vorgänge

Ein erster wichtiger Schritt zur formalisierten Beschreibung der Prozesse der Abwasserreinigung wurde mit der Matrix-Notation der IAQW getan (IAWQ-Matrix). Beispielsweise kann ein einfacher biologischer Abbauprozess mit einem Substrat S, der Biomassefraktion X und der Beschreibung des Wachstums der Biomasse unter Zehrung des Substrates in Differentialgleichungs-Darstellung wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{dX}{dt} = \left(\mu_{\max} \frac{S}{K+S} - b \right) X$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \mu_{\max} \frac{S}{K+S} X$$

mit

X	Biomasse
S	wachstumslimitierendes Substrat
μ_{\max}	maximale Wachstumsrate
Y	Yield- oder Ertragskoeffizient
K	Halbsättigungskonstante
b	Zerfallskonstante.

Biologisch laufen zwei Prozesse ab, das Wachstum der Biomasse, dessen Geschwindigkeit durch das Vorhandensein von Substrat über die Monod-Kinetik $S/(K+S)$ limitiert wird und proportional zur vorhandenen Biomasse abläuft, und ein Abbauprozess mit einer linearen Kinetik (proportional zur vorhandenen Biomasse). In der Matrix-Notation ergibt sich folgende Beschreibung:

Prozeß	Komponente	S	X	Prozeßgeschwindigkeit
1. Wachstum		$-\frac{1}{Y}$	1	$\mu_{\max} \frac{S}{K+S} X$
2. Abbau			-1	b X

In dieser Matrix existiert für jede Komponente eine Spalte und für jeden ablaufenden Prozeß eine Zeile. Die Prozeßgeschwindigkeit für jeden Prozeß wird in der letzten Spalte angegeben. Die Matrixelemente selbst sind die stöchiometrischen Faktoren, mit denen die einzelnen Stoffe bei den entsprechenden Reaktionen entstehen und vergehen.

Im folgenden nehmen wir an, daß für die durch chemische und biologische Prozesse entstehenden und vergehenden Stoffe eine allgemeine nichtlineare Funktion

$$\dot{m}_r = V \underline{R}(\underline{c}, \underline{u})$$

definiert werden kann, mit dem Volumen V , dem Vektor der Konzentrationen der bilanzierten Stoffgruppen \underline{c} und einem Vektor zusätzlicher externer Signale \underline{u} .

In Anlehnung an die IAWQ-Modellnotation wird angenommen, daß die nichtlineare Funktion \underline{R} als Produkt aus einem Vektor von Reaktionsgeschwindigkeiten für die ablaufenden Prozesse und einer Stöchiometriematrix mit konstanten Parametern berechenbar ist. Die Stöchiometriematrix beschreibt dabei, wieviel Masse der jeweiligen Stoffgruppe bei jedem Prozeß entsteht oder vergeht.

$$\underline{R}(\underline{c}, \underline{u}) = \underline{S}^T \underline{r}(\underline{c}, \underline{u})$$

mit

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{nr1} & \cdots & s_{nrn} \end{bmatrix}$$

und

$$\underline{r}(\underline{c}, \underline{u}) = \begin{bmatrix} r_1(\underline{c}, \underline{u}) \\ \vdots \\ r_n(\underline{c}, \underline{u}) \end{bmatrix}$$

3.2 Transportvorgänge

Ergänzend zum mathematischen Modell der chemischen und biologischen Prozesse müssen die Transportvorgänge (zu- und abfließende Stoffströme) beschrieben werden. Für deren formalisierte Beschreibung wurden folgende Konventionen eingeführt, die so angelegt sind, daß für alle praktischen Verfahrensvarianten eine adäquate Modellierung möglich ist. Es wird angenommen, daß in einem Rührkesselreaktor, siehe Abb. 1, mit dem Flüssigkeitsvolumen V und n bilanzierten Stoffgruppen mit den Konzentrationen c_1 bis c_n ein Zufluß q_{zu} strömt und daß ein oder zwei Abflüsse q_{ab1} und q_{ab2} existieren.

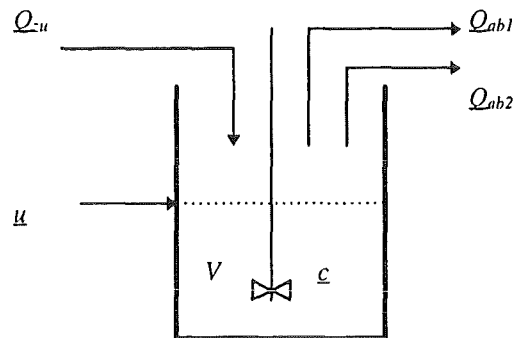


Abb. 1: Angenommener Reaktor

Für den Zufluß wird der Vektor \underline{Q}_{zu} mit den Konzentrationen c_{zu1} bis c_{zun} und dem Volumenstrom q_{zu} eingeführt. Die Abflüsse werden durch die Vektoren \underline{Q}_{ab1} und \underline{Q}_{ab2} mit den entsprechenden Konzentrationen und Volumenströmen beschrieben:

$$\underline{Q}_{zu} = \begin{bmatrix} c_{zu1} \\ \vdots \\ c_{zun} \\ q_{zu} \end{bmatrix} \quad \underline{Q}_{ab1} = \begin{bmatrix} c_{ab11} \\ \vdots \\ c_{ab1n} \\ q_{ab1} \end{bmatrix} \quad \underline{Q}_{ab2} = \begin{bmatrix} c_{ab21} \\ \vdots \\ c_{ab2n} \\ q_{ab2} \end{bmatrix}$$

Zwei unabhängige austretende Ströme wurden angesetzt, um jeweils unabhängig die Beschreibung von Volumenstrom und Konzentrationen der beiden Stoffströme vorgeben zu können. Damit ist z.B. eine transparente Modellierung von Reaktoren mit einem gepumpten Ablauf und einem Überlauf möglich. Weiterhin wirken nu zusätzliche Eingangssignale u_1 bis u_{nu} auf den Reaktor, die in dem Vektor

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_{nu} \end{bmatrix}$$

zusammengefaßt sind. Sie dienen der Erfassung äußerer Einflüsse auf das System (Vorgabe der abgezogenen Volumenströme, Energiezufuhr etc.).

Zur Beschreibung dieses Reaktors sind folgende Funktionen zu definieren.

a) Berechnung der Abflusssaufteilung:

Die beiden Funktionen $fab1$ und $fab2$ definieren die zwei austretenden Volumenströme in Abhängigkeit vom Zufluß, dem Volumen und den externen Eingangssignalen:

$$q_{ab1} = fab1(q_{zu}, \underline{u}, V)$$

$$q_{ab2} = fab2(q_{zu}, \underline{u}, V)$$

- Wird $fab1$ nicht definiert, so sei vereinbart, daß $q_{ab1} = q_{zu} - q_{ab2}$ und damit $dV/dt = 0$ gilt. Damit wird für den Reaktor ein konstantes Volumen angenommen. Darüber hinaus wird q_{ab2} auf den jeweiligen Wert von q_{zu} begrenzt angesetzt: $q_{ab2} = \min(fab2(q_{zu}, \underline{u}), q_{zu})$.
- Wird auch $fab2$ nicht definiert, so sei darüber hinaus vereinbart, daß $q_{ab2} = 0$ gilt und damit $q_{ab1} = q_{zu}$.
- Ist eine Funktion $fab1$ definiert, wird angenommen, daß gilt $dV/dt \neq 0$.

Mit den vorstehenden Konventionen ist die Beschreibung von Reaktoren mit konstantem Volumen, von Reaktoren mit überstautem Überlauf, Batch-Reaktoren im Aufstaubetrieb usw. möglich.

b) Berechnung der Volumenströme:

Für die Konzentration der n bilanzierten Stoffgruppen im Ablauf werden ebenfalls zwei unabhängige Funktionen vorgesehen:

$$\underline{c}_{ab1} = fabc1(\underline{c}, \underline{u})$$

$$\underline{c}_{ab2} = fabc2(\underline{c}, \underline{u})$$

Für die Konzentrationen sei eine Abhängigkeit von den Konzentrationen im Reaktor sowie von zusätzlichen Eingangssignalen angenommen. Für konservative Inhaltsstoffe muß dann beispielsweise $c_{ab\ i,j}=c_j$, $i=1,2; j=1..n$ gelten, oder für immobilisierte Fraktionen $c_{ab\ i,j}=0$, $i=1,2; j=1..n$. Werden die Funktionen *fab1* und *fab2* nicht definiert, wird generell von konservativen Inhaltsstoffen ausgegangen.

Um die Konventionen zu veranschaulichen, sollen für das oben eingeführte einfache Beispiel die notwendigen Funktionen zur Beschreibung der Transportprozesse angegeben werden. Hierzu nehmen wir an, daß die Prozesse in einem kontinuierlich durchströmten offenen Becken mit vernachlässigbarem Überstau ablaufen.

Beschreibung der Volumenströme:

$$\begin{aligned} q_{ab1} &= q_{zu} \\ q_{ab2} &= 0 \end{aligned}$$

Beschreibung der Konzentrationen:

$$\begin{aligned} \underline{c}_{ab1} &= \begin{bmatrix} S \\ X \end{bmatrix} \\ \underline{c}_{ab2} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4 Software-Werkzeuge zur Handhabung der Modelle

4.1 Symbolische Formulierung der Modelle

Eine Programmiersprache zur symbolischen Formelmanipulation bietet einen eleganten Zugang zur Beschreibung der biologischen und chemischen Prozesse sowie der Transportvorgänge. In unserem Fall fiel die Wahl auf die Extended-Symbolic Math Toolbox zu MATLAB®/ SIMULINK™, die einen Maple® Kern nutzt. Der Modelldefinition dienen folgende symbolische Variablen.

Deklaration der Variablen

- c* (Vektor $n \times 1$) Bezeichnungen der Konzentrationen
- u* (Vektor $nu \times 1$) Bezeichnungen der zusätzlichen Eingangssignale
- p* (Vektor $npa \times 1$) Bezeichnungen aller verwendeten Parameter

Definition von Hilfsvariablen (optional)

- rh* (Vektor $nh \times 1$) Symbolische Formeln mit der Definition von Hilfsvariablen

Definition der Transportprozesse (optional)

- fab1* Funktion zur Definition des Volumenstroms von Abfluß 1
- fab2* Funktion zur Definition des Volumenstroms von Abfluß 2
- fab1* (Vektor $n \times 1$) Funktionen zur Definition der Konzentrationen im Abfluß 1
- fab2* (Vektor $n \times 1$) Funktionen zur Definition der Konzentrationen im Abfluß 2

Definition der biologischen und chemischen Prozesse

- S* (Matrix $nr \times n$) Stöchiometriematrix
- r* (Vektor $nr \times 1$) Vektor der Funktionen zur Definition der Prozeßgeschwindigkeiten

Das MATLAB[®]-Skript zur symbolischen Modelldefinition für das obige einfache Beispiel lautet:

```
% Biologie:
% Konzentrationen:
c=['S '
  'X '];

% Keine zusätzlichen Eingangssignale
u=[];

% Parametervektor
p=['Y '
  'mumax'
  'K '
  'b '
  'Vmin '];

% Stöchiometriematrix
S=[' -1/Y, 1'
  ' 0, -1'];

% Hilfsvariablen
rh=['V=Vmin'];

% Prozeßgeschwindigkeiten
r=['mumax*S/(K+S)*X'
  'b*X'];

% Transportvorgänge
% Konstantes Volumen, ein Abfluß
fab1=[];
fab2=[];

% Konservatives Verhalten
fabc1=[];
fabc2=[];
```

4.2 Automatische Implementierung der Modelle

Die erhaltene symbolische Beschreibung stellt den Ausgangspunkt für den weiteren Umgang mit dem Modell dar. Bei den Verfassern ist die Implementierung der Modelle in die Simulation und hier vorzugsweise in das System SIMULINK™ das Ziel. Möglich ist dies prinzipiell in der MATLAB[®]-Sprache oder in einer der beiden Programmiersprachen C und FORTRAN. Da die betrachteten Modelle der biologischen Abwasserreinigung in der Regel eine relativ große Komplexität erreichen, ist aus Laufzeitgründen für eine interaktive Arbeit mit den Simulationsmodellen nur die Implementierung in C (oder FORTRAN) aussichtsreich. Die manuelle Codierung der Modelle als C-Funktionen unter SIMULINK™ setzt allerdings eine gewisse Erfahrung voraus, sie ist potentiell fehlerträchtig und mit Aufwand verbunden. Insbesondere dann, wenn sich häufige Iterationen von Modelldefinition, Modifikation und Simulationsexperiment erforderlich machen, ist dieser Weg nicht mehr praktikabel.

Aus diesem Grund wurde ein Software-Werkzeug entwickelt, das automatisch entsprechend der oben geschilderten Methodik formulierte symbolische Modelle in C-Funktionen unter SIMULINK™ überführt. Eine solche automatische Generierung von Modellen reduziert den Zeitaufwand und die Fehleranfälligkeit des Vorgehens drastisch. Die Modellgenerierung wurde in Form eines Filters unter MATLAB[®] programmiert. Das folgende MATLAB[®]-Skript zeigt die notwendigen Kommandos zur Nutzung des Tools:

```
%Generierung des C-Quellcodes des Modellblocks
ok=rk2c('simple',c,u,p,S,r,fab1,fab2,fabc1,fabc2,rh);

% Compilierung des Modells
%!cmex simple.c
```

Die Funktion `rk2c` erzeugt hierbei aus den symbolischen Variablen den C-Quelltext `simple.c`, der mit dem darauffolgenden Kommando zur ausführbaren Simulationsfunktion `simple.mex` compiliert wird. Der folgende Auszug des bereits für dieses akademische Beispiel 150 Zeilen umfassenden Quellcodes beschreibt die Funktion zur Berechnung der Ableitung der Zustandsvariablen nach der Zeit.

```
static void mdlDerivatives(double *simba_dx, const double *simba_x, const double
*simba_u, SimStruct *simba_S, int simba_tid)
{
double simba_qab1,simba_qab2;
double simba_xs[2];
double *simba_p;
```



```

int simba_i;
double simba_r1,simba_r2;
double V;
#define S    simba_xs[0]
#define X    simba_xs[1]
#define Y    simba_p[0]
#define mumax simba_p[1]
#define K    simba_p[2]
#define b    simba_p[3]
#define Vmin simba_p[4]
#define qzu simba_u[2]
    simba_p=mxGetPr(ssGetArg(simba_S,0));
    for (simba_i=0;simba_i<2;simba_i++) {
        if (simba_x[simba_i]<0) simba_xs[simba_i]=0.0;
        else simba_xs[simba_i]=simba_x[simba_i];
    };
    V = Vmin;
    simba_r1 = mumax*S/(K+S)*X;
    simba_r2 = b*X;
#undef S
#undef X
#define S    simba_x[0]
#define X    simba_x[1]
    simba_qab2=0.0;
    simba_qab1=qzu-simba_qab2;
    simba_dx[0] = -1/Y*simba_r1;
    simba_dx[1] = simba_r1-simba_r2;
    simba_dx[0]+=(simba_u[0]-S )*qzu/V;
    simba_dx[1]+=(simba_u[1]-X )*qzu/V;
.
.
.

```

Das Modell steht im Ergebnis als grafischer Block unter SIMULINK™ zur Verfügung und kann mit weiteren Blöcken verschaltet werden, um die gewünschte Prozeßbeschreibung, beispielsweise die einer Rührkesselkaskade, zu realisieren.

4.3 Automatische Dokumentation

Eine verlässliche Dokumentation des implementierten Modells ist nicht nur wünschenswert, sie ist auch für die Validierung der Modelldefinition wichtig. Ein geeigneter Weg besteht im automatischen Erzeugen einer Dokumentation des implementierten Modells. Hierzu wurde ebenfalls ein MATLAB®-Filter programmiert, das ausgehend von der symbolischen Modellbeschreibung ein LaTeX-Dokument liefert.

Mit den MATLAB®-Kommandos

```

% Generierung der Modelldokumentation (3 Teile)
ok=rk2tex('simple1',c,u,p,S,r,fab1,fab2,fabc1,fabc2,rh,[],0);
ok=rk2tex('simple2',c,u,p,S,r,fab1,fab2,fabc1,fabc2,rh,[],1);
ok=rk2tex('simple3',c,u,p,S,r,fab1,fab2,fabc1,fabc2,rh,[],2);

```

wird dieses Dokument erzeugt. Hier erweist sich die Beschreibung von Dokumenten durch reine ASCII-Dateien unter LaTeX als äußerst nützlich. Zum folgenden Auszug aus dem Quelltext mit der Stöchiometriematrix findet sich im Anhang zu diesem Beitrag die automatisch erhaltene Modell-dokumentation.

```

Stöchiometrie:
\begin{tabular}{l|cc}
\hline
Prozeß
& S & X\
\hline
1
& $\displaystyle{-Y^{-1}}$

```

```

) $ & $ \displaystyle{1
} $ \
2
& $ \displaystyle{0
} $ & $ \displaystyle{-1
} $ \
\hline
\end{tabular}

```

Dieses Werkzeug zur automatischen Dokumentation ist nicht nur unerlässlich für eine schnelle Überprüfung der symbolischen Modelldefinition, sondern verhilft darüber hinaus ohne nennenswerten Aufwand zu gut dokumentierten Modellen, die zugleich auch interdisziplinär leichter diskutiert werden können.

4.4 Beispiel: Simulation biologischer Kläranlagen mit SIMBA®

Im Zuge der von den Autoren betriebenen Weiterentwicklung eines speziellen Simulationssystems für die biologische Abwasserreinigung [SIM 95] wurden gute Erfahrungen mit der skizzierten Methodik der Modellimplementierung gesammelt. Insbesondere wird die Integration neuer chemischer und biologischer Modelle in das System SIMBA® gut unterstützt. Aufbauend auf der symbolischen Modelldefinition kann ein neues Modell mit einem speziellen Aufbau des Konzentrationsvektors dem Simulationssystem bekannt gemacht werden, so daß sich viele wichtige SIMBA®-Standardblöcke (Blöcke zur Beschreibung von Vor- und Nachklärung, Aufteilung und Vereinigung von Stoffströmen etc.) sofort mit dem neudefinierten Reaktor-Block zusammenschalten lassen.

Das folgende grafische Simulationsmodell zeigt als Beispiel eine biologische Kläranlage (nur CSB Reduktion), die als wesentlichen Teil das in diesem Beitrag strapazierte einfache Belebtschlamm-Modell (Block simple) enthält. Die restlichen Modellblöcke zählen zum Standard des Simulationssystems.

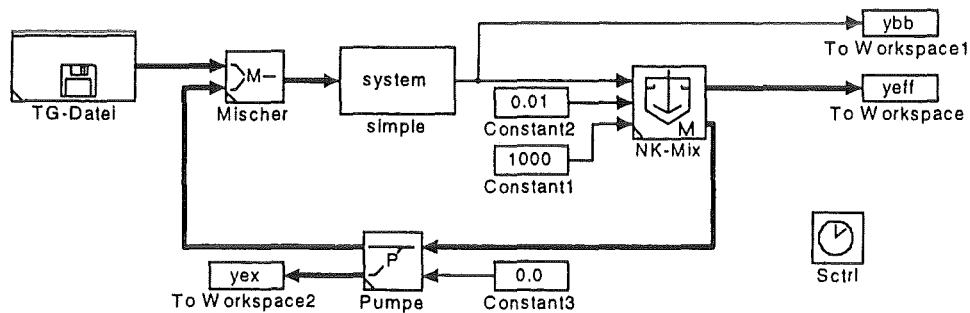


Abb. 2: Simulationsmodell einer einfachen Kläranlage

Die Ergebnisse einer Simulation lassen sich komfortabel mit speziellen Visualisierungsfunktionen des Systems beurteilen, die sich ebenfalls automatisch der verwendeten Modellstruktur anpassen. In der folgenden Abbildung ist beispielsweise der SIMBA®-Monitor dargestellt, mit dem aufgezeichnete Stoffströme angezeigt werden können. Das Aussehen der Button-Leiste dieses Monitors richtet sich nach den im Modell bilanzierten Stoffgruppen.

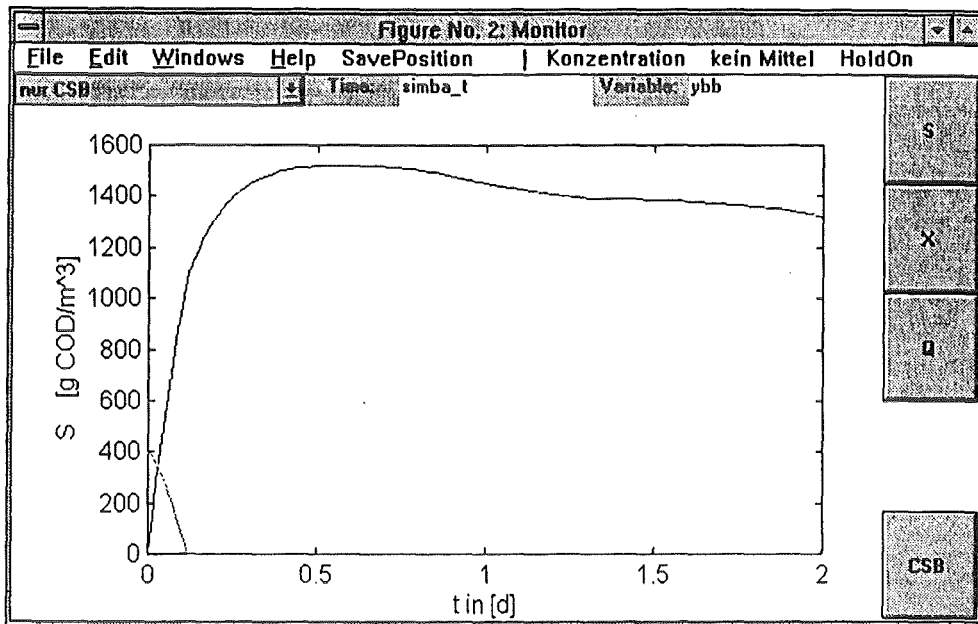


Abb. 3: Modellabhängig gestalteter Visualisierungsblock

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die bei der Darstellung mathematischer Modelle der biologischen Abwasserreinigung in der Literatur eingeführte Matrix-Notation hat sich als ein günstiger Ausgangspunkt für eine durchgehend formalisierte Beschreibung und Implementierung entsprechender Simulationsmodelle erwiesen. Im vorstehenden Beitrag wurde anhand eines einfachen erläuternden Beispiels eine neue Methode dargestellt, mit der sich aufwandsarm und fehlersicher unmittelbar einsatzbereite Simulationsmodelle erzeugen lassen. Ausgehend von der vorgeschlagenen formalisierten Beschreibung der biologischen und chemischen Prozesse sowie der Transportvorgänge war es unter Verwendung von Standard-Software zur symbolischen Formelmanipulation möglich, Werkzeuge für eine automatisierte Modellimplementierung zu schaffen. Bei der Modellbildung für komplexe Prozesse der Abwasserreinigung haben sich Prototypen dieser Software-Werkzeuge bereits als sehr leistungsfähig erwiesen.

Eine Erweiterung der entwickelten Methodik auf andere Prozeßklassen [BAS 95] scheint prinzipiell denkbar und ist vorgesehen. Zunächst soll versucht werden, das Gerüst der Modellbeschreibung so anzupassen, daß für weitere praktisch relevante Verfahren der Abwasserreinigung momentan erforschte Modellansätze eine Prozeßsimulation möglich ist.

Literatur

- [BAS 95] Bastin, G.; Van Impe, J. F.: Nonlinear and Adaptive Control in Biotechnology: A Tutorial. European Journal of Control 1 (1995) 1, pp. 37-53.
- [HEN 87] Henze, M.; Grady Jr, C.P.L.; Gujer, W.; Marais, G.v.R.; Matsuo, T.: *Activated Sludge Model No. 1*. IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, London, 1987.

- [HEN 94] Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T.; Matsuo, T.; Wentzel, M.C.; Marais, G.v.R.: *The Activated Sludge Model No. 2*. IAWQ Scientific and Technical Reports, Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, pp. 1 - 9.3, London, 1994.
- [MAT 94] *MATLAB User's Guides and SIMULINK User's Guide*. The MathWorks, Inc., Natick, Mass., 1993.
- [SIM 95] *SIMBA 3.0+ - Simulation der biologischen Abwasserreinigung*, zur Verwendung mit MATLAB/ SIMULINK. Handbuch, Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg, 1995.
- [SYM 93] *Symbolic Math Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc., Natick, Mass., 1993.

Anhang Automatisch erzeugte Dokumentation des Modells

Modelldefinition

Deklarationen:

Nr.	Fraktion	Nr.	Eingang	Nr.	Parameter
1	S			1	Y
2	X			2	mumax
				3	K
				4	b
				5	Vmin

Hilfsvariablen:

$$V = Vmin \quad (1)$$

Prozesse:

$$r1 = \frac{mumax SX}{K + S} \quad (2)$$

$$r2 = bX \quad (3)$$

Stöchiometrie:

Prozeß	S	X
1	$-Y^{-1}$	1
2	0	-1

Transport:

Ablauf=Zulauf, $V = konst.$

Ablaufkonzentrationen=Reaktorkonzentrationen

**3 Anwendung des Simulationsmodells
REGIOPLAN* auf die Region Oberengadin.**

Grebe, N.; Wegele, P.

Anwendung des Simulationsmodells REGIOPLAN⁺ auf die Region Oberengadin

*Dipl. Inf. Norbert Grebe, cand. inf. Petra Wegele,
Universität Passau, 94030 Passau*

1 Das Raumplanungsmodell REGIOPLAN⁺

REGIOPLAN⁺ ist im Rahmen eines FORWISS¹-Projekts für den Einsatz der Simulation in der Regionalplanung entwickelt worden. Es unterstützt die Entscheidungsträger bei der Analyse des realen Systems sowie bei der Entwicklung und Bewertung von planerischen Maßnahmen für die Zielregion. Darüber hinaus können Einheimische und Besucher durch das Experimentieren am Modell für die Problematik des landschaftlichen Gebiets sensibilisiert werden, indem sie verschiedene Szenarien am Rechner durchführen.

Die Struktur des Modells zeigt Abbildung 1. Das Gesamtmodell besteht aus elf Subkomponenten, die im allgemeinen ihrerseits weiter untergliedert sind. Diese Hierarchiebildung geht in der aktuellen Modellversion bis zu vier Ebenen tief. Ein Pfeil zwischen zwei Komponenten in der Abbildung bedeutet, daß der Baustein am Pfeilende lesenden Zugriff auf eine oder mehrere Modellgrößen des Bausteins am Pfeilursprung ausübt. So ergibt sich ein stark vernetztes Modell der realen Region.

Im linken Teil von Abbildung 1 befinden sich die Teilmodelle, die sich mit den Personen in einer Region beschäftigen: das Bevölkerungs- und das Besuchermodell. In der Mitte, unter dem Statistikmodul, das im wesentlichen der Zusammenfassung wichtiger Modellgrößen dient, erkennt man die Teilmodelle, die die regionale Fläche beanspruchen: das Wirtschafts-, das Infrastruktur- und das Wohnungsmodell. Der Flächenbaustein sorgt für die konsistente Verwaltung der verfügbaren Fläche. Der rechte Abbildungsteil zeigt über dem Außenweltmodul, das die externen Einflüsse auf die Untersuchungsregion modelliert, die Komponenten, die das Kapital in einer Region darstellen: der private Konsum von Bevölkerung und Besuchern, die öffentlichen Ausgaben für die Infrastruktur sowie die Investitionen in die regionale Wirtschaft.

REGIOPLAN⁺ ist in SIMPLEX-MDL, der Modellbeschreibungssprache des Simulationssystems SIMPLEX II, implementiert worden. Sie unterstützt den objektorientierten Ansatz der Modellspezifikation durch die Möglichkeit, ein Modell aus beliebig vielen, selbständigen Teilmodellen hierarchisch aufzubauen, eventuell unter Verwendung des Klassenkonzepts. Die Anwendung von REGIOPLAN⁺ auf ein Gebiet besteht in der Vorbesetzung seiner Konstanten und Zustands-

1. Bayerisches Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme Erlangen-München-Passau

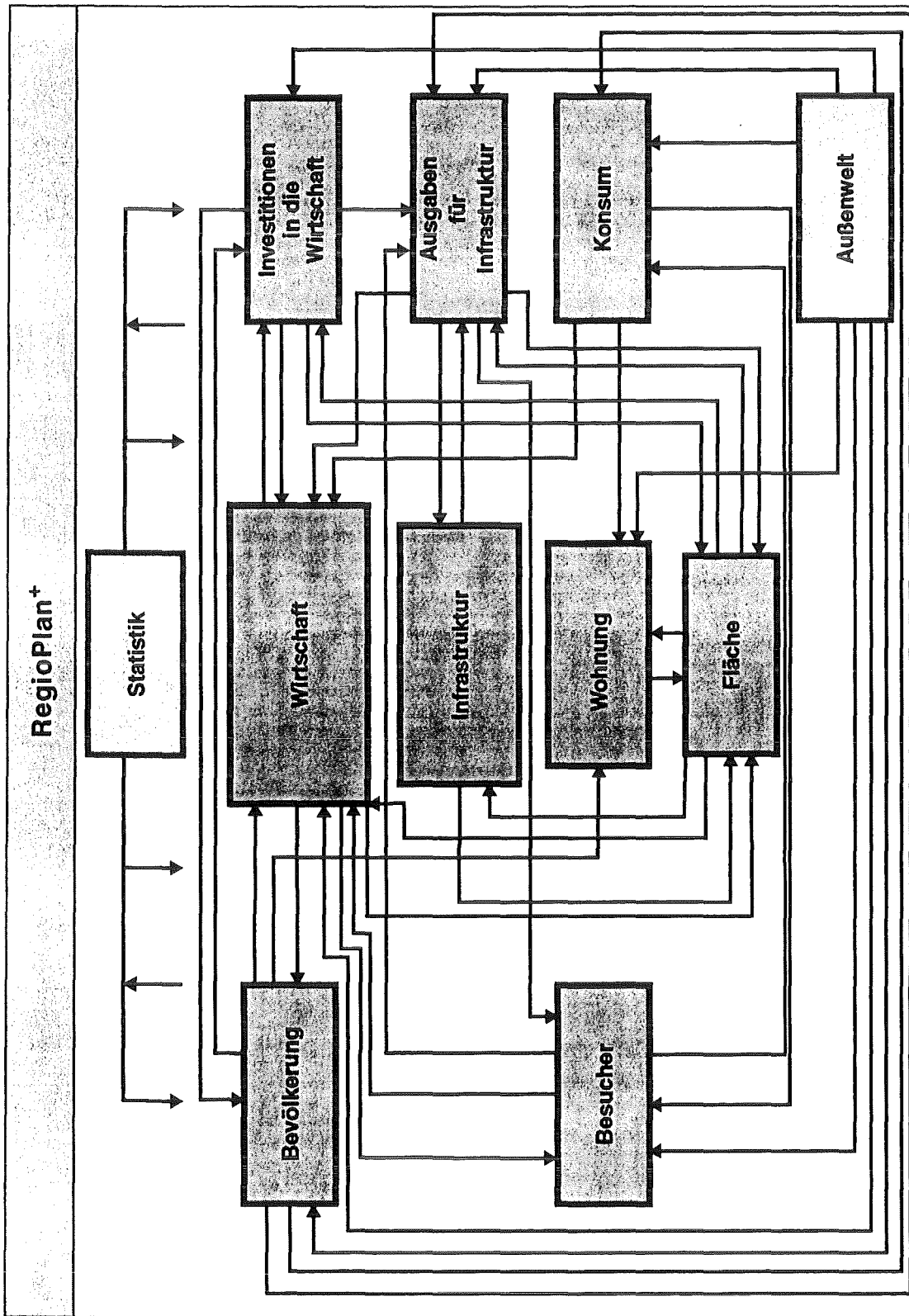


Abbildung 1: Die Struktur von REGIOPLAN+

variablen mit den realen Werten der Untersuchungsregion aus dem Initialisierungsjahr der Simulationsstudie.

Die nächsten Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die einzelnen Subkomponenten.

1.1 Die Wirtschaft

Eine der bedeutendsten Einflußgrößen in der Regionalplanung ist die Wirtschaftskraft einer Region. Wichtige Kennziffern sind beispielsweise die Zahl der Arbeitsplätze, die Größe der Gewerbefläche und die Höhe der Umsätze aller Wirtschaftssektoren der Region. Insbesondere dem Arbeitsplatzangebot kommt große bevölkerungspolitische Bedeutung zu, da es die Zu- und Abwanderung einer Region maßgeblich bestimmt.

Um die Wirtschaft eines Untersuchungsgebietes genauer untersuchen zu können, wird sie in verschiedene Bereiche unterteilt. In den von REGIOPLAN⁺ modellierten Regionen empfiehlt sich durch die wirtschaftliche Bedeutung der Landwirtschaft und des Tourismus eine Einteilung in die Bereiche Landwirtschaft, Forstwirtschaft, produzierendes Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Touristik.

Bei Gebieten mit ausgeprägtem Tourismus ist eine feinere Unterteilung des letztgenannten Bereichs vorzunehmen. In REGIOPLAN⁺ werden daher vier verschiedene Hotelkategorien modelliert: Kurhotels, Hotels mit gehobenem bzw. normalem Standard sowie Parahotellerie. Unter letzterer sind Ferienwohnungen, Jugendherbergen, Campingplätze und ähnliches zu verstehen. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal ist der jeweilige Übernachtungspreis.

Demnach besteht das Wirtschaftsmodell aus acht Sektoren, die durch Anwendung des Klassenkonzepts durch Ausprägungen derselben Modellklasse repräsentiert werden. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der System-Dynamics-Darstellung dieser Modellklasse.

1.2 Die Investitionen in die Wirtschaft

Das Anlagevermögen der Wirtschaft wird durch Investitionen erhöht. Gleichzeitig schaffen Investitionen neue Arbeitsplätze, beanspruchen Nutzfläche und schaffen Investitionsnachfrage nach Produkten und Dienstleistungen der Region sowie der Außenregion. Die Abgaben an den regionalen Haushalt in Form von Gewerbesteuern werden ebenfalls in diesem Modul ermittelt. Darüber hinaus fließen von außen Subventionen in die regionale Wirtschaft.

Die Komponente ist in gleicher Weise wie das Wirtschaftsmodul, nämlich aus acht Investitionssektoren, aufgebaut.

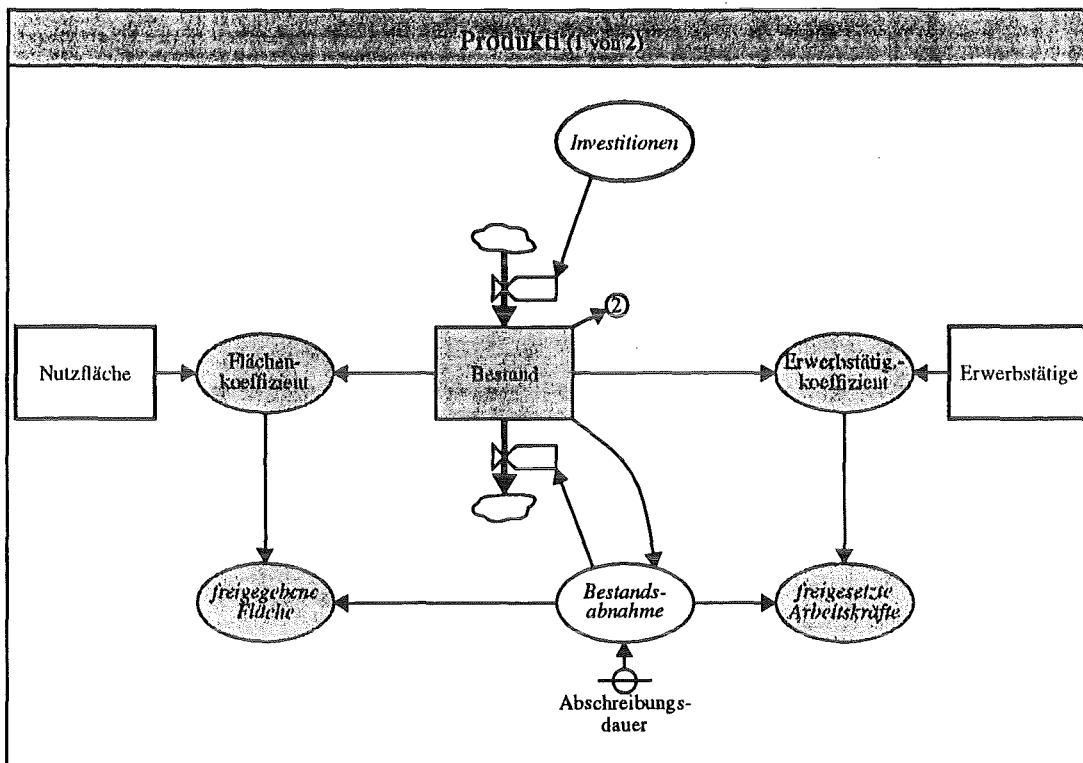


Abbildung 2: Teildynamogramm eines Wirtschaftssektors

1.3 Die Bevölkerung

Natürlich interessiert in der Regionalplanung ganz besonders die Entwicklung und Struktur der ansässigen Wohnbevölkerung. Sie erfährt eine Zunahme durch Geburten und Zuwanderung, während Sterbefälle und Abwanderung zu einem Rückgang führen. Das quantitative und qualitative Angebot an Arbeitsplätzen in der Wirtschaft beeinflusst in besonderem Maße die Migration. Aus diesem Grunde besteht in REGIOPLAN⁺ eine sehr enge Kopplung mit dem Wirtschaftsbereich, denn auch das Bevölkerungsmodell unterscheidet insgesamt acht Bevölkerungssektoren, wobei die Hotelkategorien zur Touristik zusammengefaßt sind.

Für jeden Wirtschaftssektor berechnet das Modell die Zahl der Erwerbstätigen und die der Arbeitslosen. Außerdem unterscheidet REGIOPLAN⁺ die Berufsein- und -auspendler mit deren verursachtem Verkehrsaufkommen. Dies stellt gerade in ländlichen Gebieten oftmals ein großes Problem für die Regionalplanung dar.

Die Wohnbevölkerung ist altersmäßig strukturiert, so daß im aktuellen Modell fünf Altersklassen unterschieden werden können. Somit lassen sich Untersuchungen durchführen, die beispielsweise einer Überalterung der Wohnbevölkerung durch Abwanderung entgegenwirken sollen.

1.4 Die Besucher

In den für die Anwendung von REGIOPLAN⁺ vorgesehenen Regionen spielt der Tourismus als Wirtschaftsfaktor eine wesentliche Rolle. Aus diesem Grund ist der Bereich des Gastgewerbes im Modell aufgegliedert in vier Hotelkategorien, deren Übernachtungsangebot analog von vier Besuchergruppen nachgefragt wird: von Kurgästen, von Gästen der gehobenen Kategorie, von Gästen der Standardkategorie sowie von Parahotellerie-gästen.

Diese Besucher-kategorien unterscheiden sich neben ihrer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer sowohl im Ausgabeverhalten in ihrem Urlaubsgebiet als auch in ihrer Sensibilität für die attraktivitätsbestimmenden Charakteristika der Region, wie zum Beispiel den Besucherdruck oder das Verkehrsaufkommen.

REGIOPLAN⁺ modelliert neben der Zahl der Übernachtungsgäste auch die der Tagesausflügler. Diese Gruppe stellt – beispielsweise durch das verursachte Verkehrsaufkommen und die zugehörigen Schadstoffemissionen – in vielen Regionen ein Problem dar, da sie vergleichsweise vielerorts nur geringe wirtschaftliche Relevanz besitzt.

1.5 Die Fläche

Die Fläche einer Region unterteilt sich in nutzbare Fläche und Ödland, das wegen seiner Lage oder Beschaffenheit nicht für Flächennutzung zur Verfügung steht. Das können beispielsweise Hochgebirgsregionen, Seen, Sumpfland oder auch geschützte Flächen sein. Die nutzbare Fläche wird unterschieden in bereits genutzte und in noch verfügbare Fläche, zum Beispiel für Investitionen oder zum Wohnungsbau.

Die Art und die Struktur der Flächennutzung bestimmen das Landschaftsbild einer Region. Eine für Bevölkerung und Besucher gleichermaßen attraktive Region besteht aus einer idealen Zusammensetzung der verschiedenen Flächennutzungstypen. Dies wird im Modell nachgebildet durch die Berücksichtigung von insgesamt fünfzehn Flächennutzern.

1.6 Die öffentliche Infrastruktur

In der aktuellen Modellversion der öffentlichen Infrastruktur existieren die für die Bevölkerungs- und Tourismusentwicklung relevanten Bereiche »Verkehr«, »sonstige Infrastruktur« und »Naturschutzeinrichtungen« sowie als weitere wichtige Kostenträger im öffentlichen Haushalt »Bildung/Soziales« und »Verwaltung«. Unter dem Sammelbegriff »sonstige Infrastruktur« sind beispielsweise öffentliche Schwimmbäder und Kultureinrichtungen, aber auch Wanderwege und Skilifte zu verstehen. Das Modul berechnet unter anderem die Größen der Anlagevermögen sowie Attraktivitäten, die in die Gesamtattraktivität der Region eingehen.

1.7 Die Ausgaben für die öffentliche Infrastruktur

Diese Komponente ermittelt die Ausgaben für die öffentliche Infrastruktur der Region, die in der aktuellen Modellversion in die oben genannten fünf Bereiche eingeteilt ist.

Sie berechnet sowohl die Kosten zum Betrieb der bestehenden Anlagen als auch die Neuinvestitionen. Außerdem werden soziale Aufwendungen und der Werbungsaufwand für die Region in bezug auf den Tourismus berücksichtigt. Die Einnahmenseite besteht im Modell aus Steuern, unterteilt in Einkommen-, Gewerbe- und Grundsteuer, aus Einkünften aus Infrastruktureinrichtungen, aus Sondereinnahmen aus dem Fremdenverkehr sowie aus externen Zuschüssen, beispielsweise von Bund und Ländern.

Außerdem ermittelt das Teilmodell die Verschuldung der Region, die Kreditbeschaffung und verteilt gegebenenfalls Investitionskapital auf die einzelnen Bereiche.

1.8 Die Wohnungen

In diesem Baustein von REGIOPLAN⁺ findet die Berechnung der Wohneinheiten statt. Es wird unterschieden zwischen Erstwohnungen für die Bevölkerung und Zweitwohnungen für Auswärtige. In einigen Regionen stellt die Zunahme an Zweitwohnungen ein Problem dar, da sie einerseits für die Gemeinden Anschlußkosten verursachen, andererseits aber nur wenige kommunale Einnahmen bringen. Außerdem sind Wohnungen, die nur wenige Tage im Jahr bewohnt sind, optisch wenig reizvoll. Nicht umsonst gibt es in den letzten Jahren verstärkte Anstrengungen von Gemeinden, den Erwerb von Wohnungen durch Nichtansässige zu verhindern oder zumindest zu erschweren. Auch solche planerischen Maßnahmen und ihre Konsequenzen lassen sich mit dem Modell überprüfen.

1.9 Der Konsum

Dieses Teilmodell dient der Berechnung der privaten Nachfrage durch die ansässige Wohnbevölkerung und durch die Besucher der Region. Dabei wird davon ausgegangen, daß im Modell neun Anbieter von Produkten bzw. Dienstleistungen sowie sechs Nachfragergruppen existieren: Dies sind auf der Angebotsseite die acht Wirtschaftssektoren und die Außenregion, während die Nachfrager aus den fünf Besucherkategorien und der ansässigen Wohnbevölkerung gebildet werden.

Für jede der sechs Nachfragergruppen wird eine verfügbare Geldmenge auf die neun Anbieter aufgeteilt. Bei der Bevölkerung ist die Berücksichtigung einer Sparquote möglich. Die Berechnung der Geldmenge unterscheidet sich bei Besuchern und Bevölkerung. Bei ersteren sind die Tagesausgaben in Verbindung mit den Gesamturlaubstagen entscheidend, während bei letzteren das Bevölkerungseinkommen maßgeblich ist. Das Einkommen der Berufsauspendler wird besonders berücksichtigt.

1.10 Die Statistik

Bei diesem Baustein handelt es sich um ein Modul, das im Modell REGIOPLAN⁺ verschiedene Größen aus den einzelnen Subkomponenten zusammenfaßt, diese Summengrößen weiterverarbeitet oder sie an andere Subkomponenten weitergibt. Wichtige Modellgrößen sind die Gesamtattraktivität der Region, der Gesamtverkehr, die Verschmutzung, unterschieden in die Verschmutzungsarten Abfall, Abwasser und Abluft, die Siedlungsdichte, die Übernachtungsinintensität und das Pro-Kopf-Einkommen der Bevölkerung.

1.11 Die Außenwelt

Dieses Teilmodell ermittelt die äußeren Einflüsse auf die Untersuchungsregion: Subventionen und Zuschüsse unterstützen die Wirtschaft bzw. den öffentlichen Haushalt, externe Nachfragen sorgen für zusätzlichen Umsatz der heimischen Wirtschaft, die externe Attraktivität und die Erreichbarkeit der Region beeinflussen den Fremdenverkehr, und nicht zuletzt sorgen die Daten zweier externer Arbeitsmärkte für Pendelbewegungen von Berufstätigen: Während eine Außenregion durch ihre im Vergleich zur Untersuchungsregion schlechteren Arbeitsmarktdaten ein potentiellies Quellgebiet von Berufseinpendlern darstellt, kann die zweite Außenregion mit ihren relativ günstigeren Werten als Zielgebiet für Berufsauspendler aus der Untersuchungsregion gelten.

2 Die Region Oberengadin

Nach den bisherigen Anwendungen in der Gemeinde Hindelang und im Landkreis Freyung-Grafenau beschäftigt sich die jüngste Übertragung des Modells mit dem Oberengadin im Kanton Graubünden in der Schweiz. Mit Unterstützung der dortigen Mittel- und Tourismuschule in Samedan wurden in einer umfangreichen Datenerhebung die erforderlichen Regionalgrößen zusammengestellt und in das Modell eingegeben.

Die Region umfaßt ein Einzugsgebiet von insgesamt 722 km², das sich vom Malojapaß im Südwesten bis etwa 40 km in nordöstlicher Richtung erstreckt. Das Hochtal mit seinen Seen und den stark ansteigenden Hängen auf beiden Seiten, die in Gipfeln von über 3000 Metern Höhe enden, ist landschaftlich besonders reizvoll. Haupteinnahmequelle ist der Fremdenverkehr. Heute ist vor allem der Ort St. Moritz ein Begriff in Verbindung mit mondänem Wintersporttourismus und wahrscheinlich auch einer der bekanntesten Urlaubsorte der Welt.

Doch die touristische Entwicklung des Gebiets blieb im Oberengadin leider nicht ohne negative Folgen: Das unkontrollierte Wachstum führt immer mehr zu einer Überlastung der Biosphäre durch Abwasser, Abfall und Luftverschmutzung durch Verkehr. Vor allem der enorme Ausbau des Parahotelleriesektors macht wertvolle Flächen immer knapper. Von 1970 bis 1990 wurden jedes Jahr durchschnittlich 225 neue Zweitwohnungen gebaut.

Weitere Problempunkte sind die abnehmende Aufenthaltsdauer der Gäste, sinkende Preise aufgrund steigender globaler Konkurrenz, aber auch die Übersättigung der Einheimischen durch den Tourismus und der Verlust der ursprünglichen Kultur.

Ein Umdenken ist also gefragt; nicht mehr unkontrolliertes, sondern nachhaltiges Wachstum soll das Ziel künftiger Tourismusedwicklung darstellen. Doch welche Maßnahmen und Steuerungsversuche sind dazu am besten geeignet?

Bei der Beantwortung dieser Frage, die derzeit im Oberengadin sowohl Regionalplaner als auch breite Bevölkerungsschichten beschäftigt, kann das Modell REGIOPLAN⁺ wertvolle Unterstützung bieten, indem planerische Maßnahmen mit dem Modell entwickelt und in ihren Konsequenzen überprüft werden, bevor man sie auf die Realität überträgt.

3 Beispielhafte Modelluntersuchungen

Nach einigen Simulationsläufen zur Bestimmung regionalspezifischer Parameter des Modells konnte der Vergangenheitszeitraum von 1985 bis 1995 mit für den Modellzweck ausreichender Genauigkeit nachgespielt werden. Somit steht REGIOPLAN⁺ nun für Modelluntersuchungen zur Verfügung, die die Simulation planerischer Maßnahmen für das Oberengadin verfolgen. Diese Szenarien bestehen in der gezielten Parametervariation des Modells und der anschließenden kritischen Analyse der Modellergebnisse und der Übertragbarkeit auf die zugrundeliegende reale Region.

3.1 Die Entwicklung ohne planerische Eingriffe

Ein erster Simulationslauf bis zum Jahre 2010 zeigt die Entwicklung, falls keine planerischen Maßnahmen auf das System einwirken. Besonderes Augenmerk liegt auf der Bautätigkeit, von der derzeit insbesondere das produzierende Gewerbe profitiert. Andererseits sind bereits heute die negativen Folgen dieser Entwicklung für den Tourismus spürbar.

Abbildung 3 zeigt im linken Teil, daß die als Bauland ausgewiesene Fläche etwa innerhalb der nächsten 12 Jahre vollständig genutzt wird. Sollte dann kein weiteres Bauland verfügbar sein, so führt dies zu einem allmählichen Einbruch im produzierenden Gewerbe (rechter Teil von Abbildung 3). Umsatz und Investitionen verringern sich, während die sektorielle Arbeitslosigkeit zunimmt.

Gleichzeitig macht sich ein zunehmender Attraktivitätsverlust der Region bemerkbar. Aufgrund der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes, der steigenden Umweltbelastung und des zunehmenden Besucherdrucks, der durch weiterhin steigende Tagesgästedaten verursacht wird, reagieren zunächst die Kurgäste und die Besucher der gehobenen Hotelkategorie (siehe linken Teil von Abbildung 4). Das rückläufige Geschäft führt außerdem zu einer Verringerung des Betten-

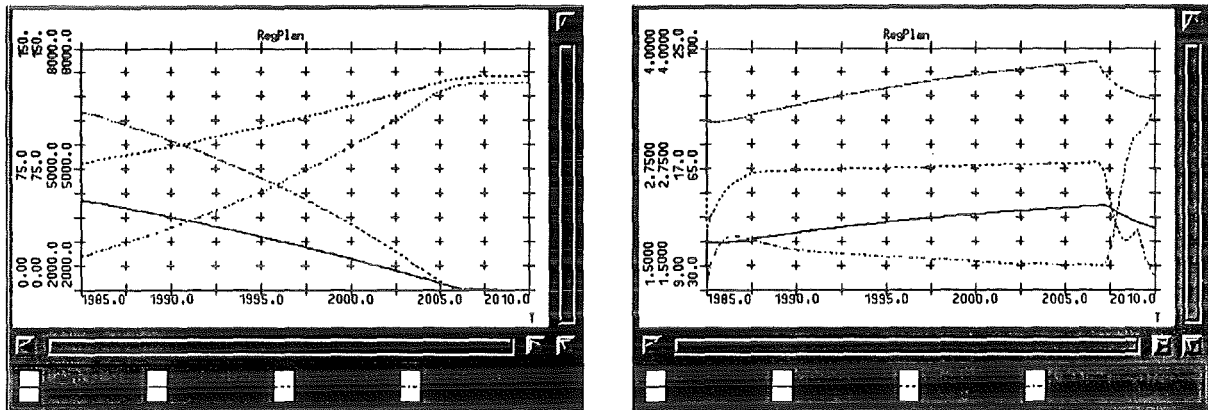


Abbildung 3: Entwicklung des Wohnungsbestands und des produzierenden Gewerbes

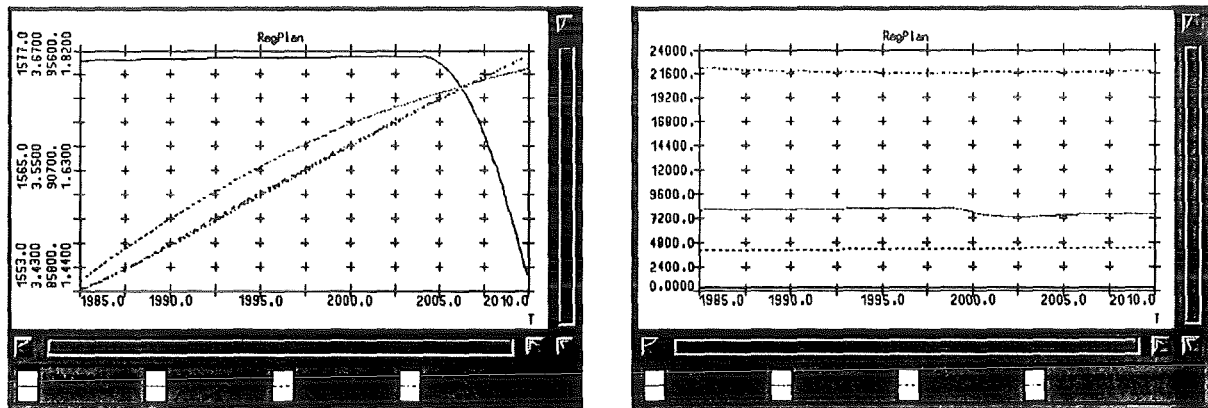


Abbildung 4: Übernachtungsgäste und Bettenangebot

angebots im Bereich der gehobenen Hotellerie, wie im rechten Teil von Abbildung 4 zu sehen ist.

Ein weiteres ungesteuertes Wachstum würde also zu einem Absinken der Region in die sogenannte Degenerationsphase von Tourismusdestinationen führen. Im folgenden Szenario soll versucht werden, durch einen sofortigen Baustopp für Wohnungen dieser Entwicklung entgegenzuwirken.

3.2 Szenario »sofortiger Baustopp«

Eine Entwicklung, die in den 60er Jahren begann und heute mittlerweile für viele schweizer Regionen zum Problem geworden ist, stellt der Zweitwohnungsbau dar. Nach einer Schätzung der schweizerischen Vereinigung für Landesplanung dürfte heute mindestens jede zehnte Wohnung in der Schweiz eine sogenannte Zweitwohnung sein. Im Oberengadin liegt der Zweitwohnungsanteil sogar bei knapp 60%.

Diese Entwicklung hat natürlich auch ihre Gründe: In Zeiten zunehmenden wirtschaftlichen Wohlstands, kürzeren Arbeitszeiten und höherer Mobilität entschließen sich immer mehr Menschen dazu, durch den Kauf von Ferienwohnungen der abnehmenden Lebensqualität in den Städten den Rücken zu kehren.

Für die betroffenen Regionen bleibt dies nicht ohne Folgen: Neben der Beeinträchtigung des Siedlungs- und Landschaftsbildes (»Rolladensiedlung«) sind der Anstieg der Baulandpreise und die daraus resultierende Verdrängung der Ortsansässigen vom Wohnungsmarkt nur einige wenige der zahlreichen Probleme, mit denen sich die oberengadiner Gemeinden auseinandersetzen müssen.

Dort wird die Situation durch die ohnehin herrschende Bodenknappheit zusätzlich verschärft. Aus diesem Grund werden seit längerem verschiedene Lösungsansätze zur Beschränkung des Zweitwohnungsbaus diskutiert, wovon einer der sofortige Stopp der Bautätigkeit ist. Dies würde bedeuten, daß nach dem Ausschöpfen der in den Quartierplänen schon genehmigten 5400 Betten (entspricht etwa 1543 Wohnungseinheiten) keine weiteren Überbauungen mehr vorgenommen werden dürfen.

Dieser Lösungsvorschlag zur Beschränkung der Zweitwohnungen soll nun mit dem Modell REGIOPLAN⁺ durchgespielt werden. Dazu werden in erster Linie die potentiellen Bauflächen und die Investitionsbereitschaft im produzierenden Gewerbe, das das Baugewerbe enthält, reduziert.

Wie im linken Teil von Abbildung 5 zu sehen, wird die reduzierte, noch verfügbare Fläche für Wohnungsbau nun in fünf bis sieben Jahren überbaut sein. Bereits mit dem Inkrafttreten des Baustoppbeschlusses kommt es zu einer langsamen Reduktion des Baugewerbes, da die Investitionsneigung durch diesen Beschluß deutlich beeinträchtigt wird. Durch die verringerte Nachfrage auf dem Wohnungsbausektor nach dem endgültigen Ausschöpfen der Bauzone wird diese Entwicklung zusätzlich verstärkt.

Abbildung 5 veranschaulicht im rechten Teil das Investitionsverhalten der nichttouristischen Wirtschaftssektoren. Auch andere Branchen, vor allem der Dienstleistungssektor, bleiben we-

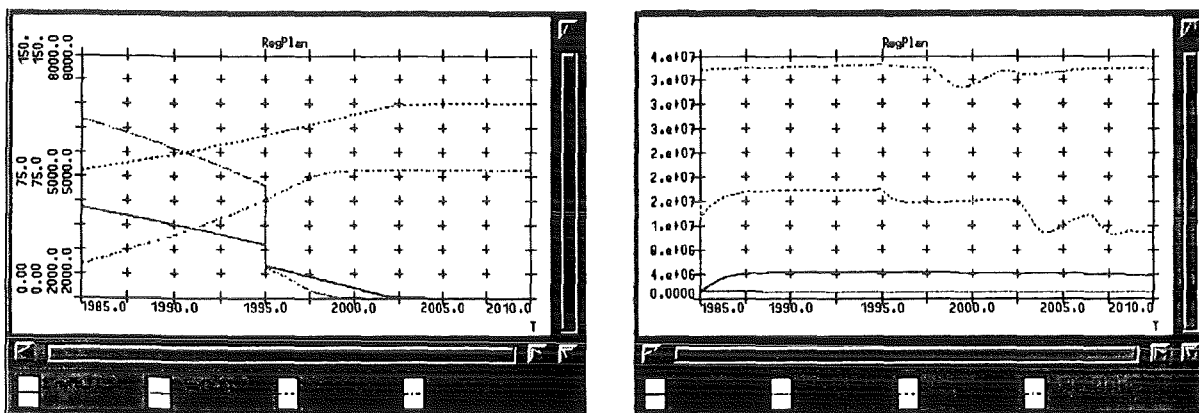


Abbildung 5: Wohnungsentwicklung und Investitionen

gen des Multiplikatoreffekts nicht unbeeinflusst und bekommen das verringerte Nachfragepotential zu spüren.

Die Arbeitslosigkeit steigt rapide an, wie Abbildung 6 im linken Teil zeigt. Bis zum Jahr 2010 gehen nahezu 800 Arbeitsplätze verloren. Die Bevölkerungsentwicklung stagniert aus diesem Grunde zunächst und verläuft etwa ab dem Jahr 2005 negativ.

Zusammenfassend muß das Szenario »sofortiger Baustopp« als zu abruptes Vorgehen verworfen werden. Wegen der großen Abhängigkeit der Region vom Baugewerbe führt ein vollständiger Baustopp zu einem wirtschaftlichen Kollaps der Region. Eine mögliche Alternative wäre die »sanfte« Kontingentierung des Wohnungsbaus.

3.3 Szenario »Kontingentierung des Wohnungsbaus«

Um den Wohnungsbau in gemäßigte Bahnen zu lenken ohne die negativen Konsequenzen eines totalen Wohnungsbaustopps, gibt es Überlegungen, neben einer jährlichen Höchstgrenze an Neubauten, die ständig herabgesetzt wird, den Hotelbetreibern Steuererleichterungen und staatliche Fördermaßnahmen zu einem qualitativen Ausbau ihrer Häuser anzubieten.

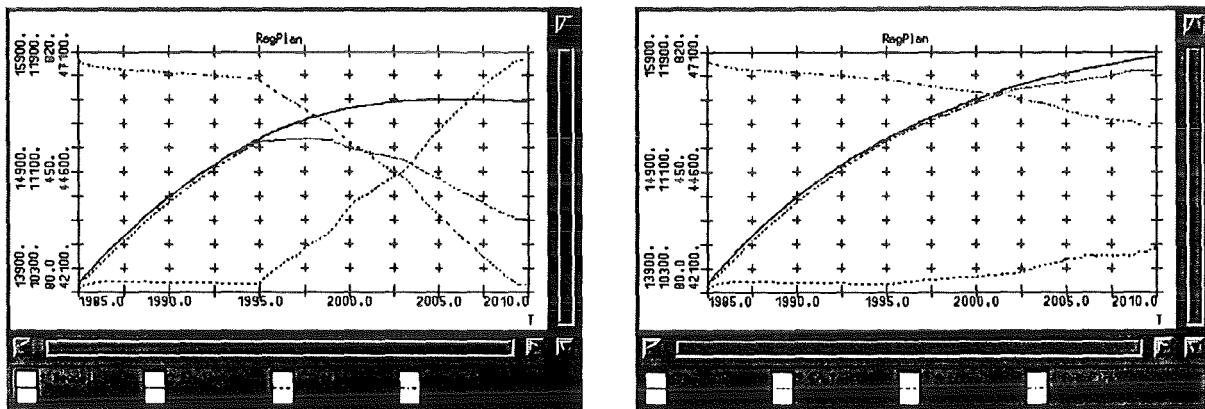


Abbildung 6: Bevölkerungsdaten mit sofortigem Baustopp (links) bzw. mit Kontingentierung (rechts)

Die Ergebnisse eines Simulationslaufs, dem diese Überlegungen zugrundeliegen, deuten die Kurven im rechten Teil von Abbildung 6 an. Man sieht deutlich in der Gegenüberstellung zum vorherigen Szenario, daß sowohl die Zahl der Bevölkerung als auch die der Erwerbstätigen bis zum Ende des Untersuchungszeitraums positiv verlaufen. Die Arbeitslosenwerte steigen allerdings trotzdem geringfügig an, während das Pro-Kopf-Einkommen in der Region einen fallenden Verlauf annimmt, der allerdings nicht so dramatisch ist wie bei einem totalen und sofortigen Baustopp.

Trotz der Erkenntnis, daß eine Kontingentierung des Wohnungsbaus besser als ein sofortiger, totaler Baustopp ist, müßten sich weitere Untersuchungen anschließen, um die noch vorhandenen negativen Folgen für die Bevölkerung und die Wirtschaft der Region abzumildern.

4 Zusammenfassung

REGIOPLAN⁺ erwies sich bei der Übertragung auf die Region Oberengadin als ein wertvolles Instrument, planerische Maßnahmen vor der Realisierung in ihrer Wirksamkeit einschätzen und testen zu können. Als positiver Nebeneffekt erweitert der Anwender durch die Arbeit mit dem Modell seine Kenntnisse über den realen Lebensraum. REGIOPLAN⁺ unterstützt das vernetzte Denken der Entscheidungsträger in der Raumplanung, die alle Lebensbereiche ihrer Region im Auge behalten müssen.

Nach den im bisherigen Projektverlauf durchgeführten Einsatzstudien liegt nunmehr ein Modell vor, das trotz seiner Komplexität überschaubar und handhabbar ist. Dies liegt in der modularen, hierarchischen Modellstruktur begründet, die es ermöglicht, bei Untersuchungen immer nur ein Teilmodul zu betrachten. Die gesamte Modelldokumentation liegt in hierarchisch vernetzten System-Dynamics-Diagrammen vor, die auch die Kommunikation mit den Fachleuten vor Ort unterstützen. Der einfache Formalismus dieser Methode erwies sich als leicht verständlich und erlernbar.

Um REGIOPLAN⁺ direkt für die Verantwortlichen in der Raumplanung zur Verfügung zu stellen, sollte es künftig eine leicht bedienbare graphische Benutzerschnittstelle erhalten, die sich auf die wichtigsten Funktionen des bisher verwendeten Simulationssystems beschränkt. Dazu gehört die Unterstützung bei der Parametrisierung, bei der Experimentdurchführung und bei der Ergebnispräsentation.

5 Literatur

Grebe, Norbert

Das übertragbare Regionalplanungsmodell REGIOPLAN⁺
in: A. Sydow (Hrsg.): 8. ASIM Symposium in Berlin, Vieweg Verlag 1993

Schmidt, Bernd

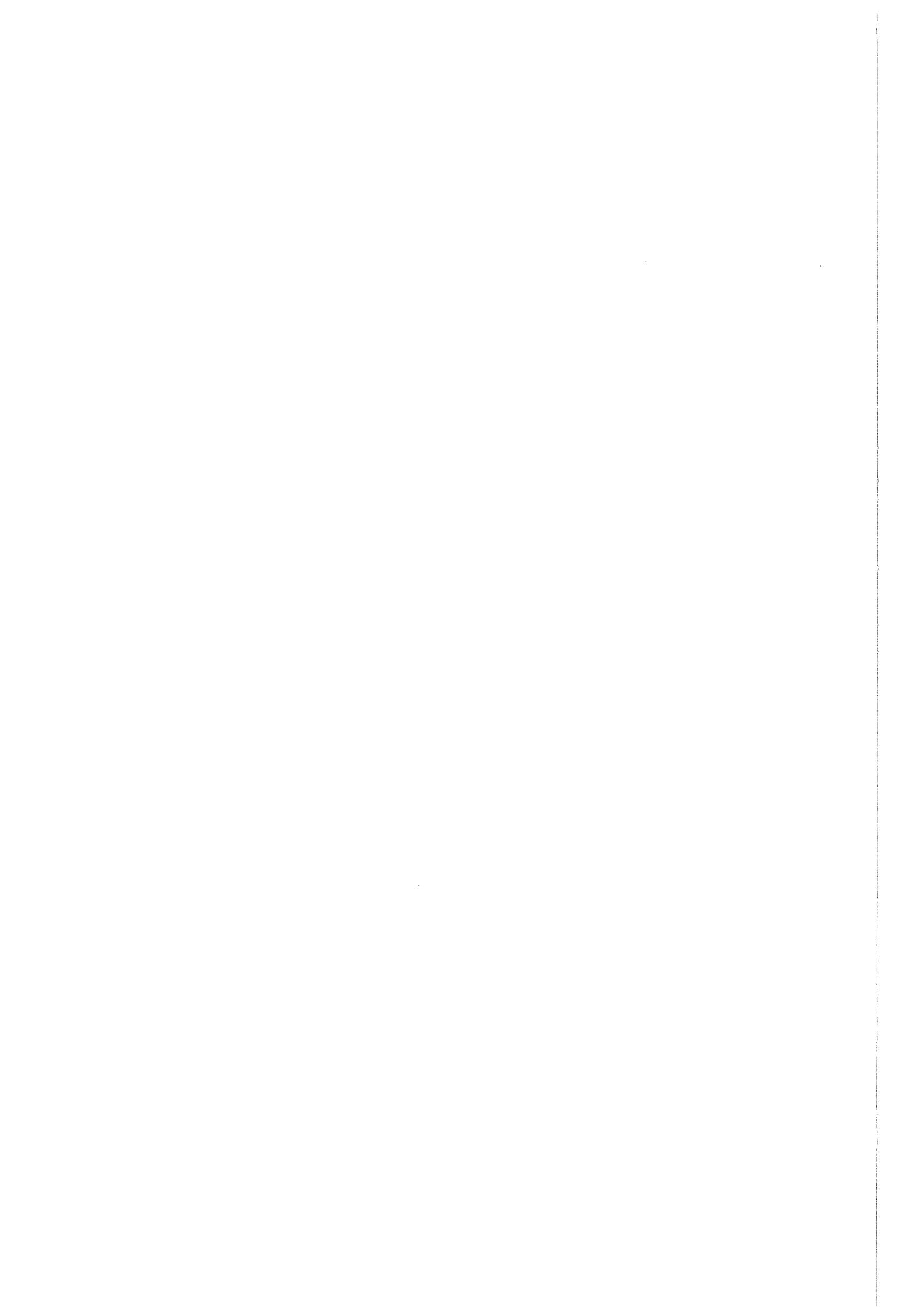
SIMPLEX II, Ein integriertes Simulationssystem, Benutzerhandbuch
SCS, Society for Computer Simulation Int., Erlangen, Ghent, Istanbul, San Diego 1995

Schweizerische Vereinigung für Landesplanung (Hrsg.)

Die Beschränkung des Zweitwohnungsbaus – Modelle und Empfehlungen für Fremdenverkehrsorte
Bern 1993

Wegele, Petra

Systemanalyse und Implementierung des öffentlichen Haushalts für ein übertragbares Regionalplanungsmodell und dessen Anwendung auf die Region Oberengadin
Universität Passau, Lehrstuhl für Operations Research und Systemtheorie, Diplomarbeit, 1996



**4 Fuzzy-Methoden und Neuronale Netze in der
Landschaftsmodellierung.**

Wieland, R.; Lutze, G.; Hoffmann, J.

Fuzzy-Methoden und Neuronale Netze in der Landschaftsmodellierung

RALF WIELAND¹ und GERD LUTZE² und JÖRG HOFFMANN³

Zusammenfassung

Für die hier untersuchten ökologischen Fragestellungen, der Habitatmodellierung und der Modellierung der Güte der Wachstumsbedingungen von Pflanzen in Abhängigkeit von Klima- und Standortfaktoren, werden Modellierungsstrategien diskutiert. Als Randbedingungen wirken die Schärfe des zur Verfügung stehenden Wissens und das Vorhandensein von Regeln, die die Domäne hinreichend genau beschreiben. Letzteres führt zu Fuzzy-Ansätzen. Stehen diese Regeln nicht zur Verfügung, so kann oft aus Beispieldaten mittels eines Neuronalen Netzes doch noch ein Modellansatz gewonnen werden. Beide Ansätze werden bezüglich typischer Einsatzfälle in ökologischen Fragestellungen untersucht.

1 Einleitung

Bei der Untersuchung ökologischer Fragestellungen werden zunehmend modellgestützte Verfahren angewendet. Besonders verbreitet ist die Anwendung der Modellierung z.B. beim Studium von Wachstums- und Entwicklungsprozessen von Tieren und Pflanzen, der Populationsdynamik und des Stoff- und Wasserkreislaufes von Naturräumen. Noch relativ wenig wird die Modellierung zur Lösung naturschutzrelevanter Fragestellungen genutzt. Das sind Aufgaben, denen sich die Habitatmodellierung annimmt. Bei dieser Modellierung geht es darum, verschiedene Faktoren, die die Güte eines Habitats

¹ZALF, Institut für Landschaftsmodellierung D-15374 Müncheberg Eberswalder Str. 84 Tel.: (033432)82337, email: rwieland@zalf.de, gefördert durch BMBF Nr.: 0339539

²ZALF, Institut für Landschaftsmodellierung D-15374 Müncheberg Eberswalder Str. 84 Tel.: (033432)82395 email: glutze@zalf.de

³Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, Institut für agrarrelevante Klimaforschung, Müncheberg, Eberswalder Str.84 15374 Müncheberg Tel.: (033432) 83820

[1] beeinflussen, zu erfassen und ihre Wirkung auf die Güte eines Lebensraumes herzuleiten. Aus dieser allgemeinen Aufgabe lassen sich eine Reihe abgeleiteter Fragestellungen beantworten:

- Wie hoch ist die aktuelle Güte zu bewerten?
- Wie hoch ist die Güte bei einer anderen Konstellation?
- Wie wirken Änderungen einer Einflußgröße?
- Lassen sich Verschlechterungen durch Änderungen anderer Einflußgrößen kompensieren?

Zur Beantwortung dieser und ähnlicher Fragestellungen wurden Modelle für die Habitatgüte der Schleiereule, der Großtrappe und des Kranichs entwickelt. Eine analoge Aufgabe wurde bei der Modellierung der Güte von Wachstumsbedingungen indigender Pflanzenarten bearbeitet, die bedingt durch die einfachere Modellstruktur, Experimenten eher zugänglich ist als die vergleichsweise komplexe Struktur der Habitatmodelle.

Eine für die Wahl der Modellierungsmethode wichtige Eigenschaft bildet die Schärfe des zur Verfügung stehenden Wissens. Häufig ist biologisches Wissen als eine umfassende Sammlung von Daten vorhanden, konkretes Wissen in Form von Abhängigkeiten, Gleichungen oder auch Regelwissen bildet eher die Ausnahme. Vor dem Modellierer steht daher die Aufgabe, geeignete Modellierungsverfahren zu wählen, die auf den konkreten Zustand des Fachwissens eingehen und diesen als Eingangsgrößen akzeptieren. Hier kommen verstärkt Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) zum Einsatz, oder wie in unserem Fall nach einer Transformation der Eingangsgrößen in den Bereich der reellen Zahlen, Neuronale Netze und Fuzzy-Algorithmen.

Eine weitere wichtige Forderung, die bei der Modellierung biotischer Komponenten zu erfüllen ist, lassen sich durch die Eigenschaften 'Robustheit' und 'Kompensation' zusammenfassen. Robustheit meint in unserem Fall, daß kleine Änderungen in der Eingangsgröße (z.B. durch Meßfehler) nur dann zu einer spürbaren Änderung der Ausgangsgröße führen sollen, wenn die Änderungen der Eingangsgröße in sensiblen Gebieten lagen. Falls aber die Eingangsgrößen sich im Zentrum ihrer Klassen (beim Fuzzy-Modell) befinden, so sollen kleine Änderungen möglichst keine Auswirkungen auf das Modell haben. Diese Forderung ist einmal wichtig um den subjektiven Charakter von Beobachtungen möglichst klein zu halten, andererseits widerspiegelt sie aber auch die Beobachtung, daß biologische Systeme bis zu einer gewissen Grenze belastbar sind, ehe sie dramatisch auf Umwelteinflüsse reagieren. Diese "dramatische" Reaktion vollzieht sich genau an den Grenzen

der Klassen, wo auch das Modell sensibel reagieren soll. Diese Eigenschaft biologischer Systeme, läßt sich über die inneren dynamischen Beziehungen des biologischen Objektes erklären, die sich aber einer phänomenologischen Modellierung, wie in unserem Fall, der Sichtbarkeit entziehen.

Unter Kompensation soll die Möglichkeit verstanden werden, eine Änderung einer Eingangsgröße, die zu einer Verschlechterung der Güte führt, durch eine Änderung einer oder mehrerer Eingangsgrößen zu kompensieren. Die Kompensation hat aber nicht die Charakteristik einer Regelung im klassischen Sinn, da im Vorhinein nicht feststeht, welche Eingangsgröße als Störgröße wirkt, auch sind die Stellmöglichkeiten nicht apriori bekannt. Weiterhin ist zu beachten, daß eine Kompensation nur in einem kleinen Bereich der Eingangsgrößenschwankungen wirksam werden kann. Eine Überschreitung des Kompensationsbereiches (der sich dynamisch mit der Situation ändert) bewirkt eine Verschlechterung der Güte.

In den weiteren Abschnitten soll die Wechselwirkung der Forderung nach Robustheit und Kompensation untersucht werden.

2 Fuzzymodell und Neuronale Netze

2.1 Fuzzy-Ansatz

Unscharfes Wissen wird mittels unscharfer Mengen und darauf aufbauenden Regeln formalisiert. Unter einer unscharfen Menge A soll im weiteren folgendes verstanden werden:

$$A = \{(x_1, \mu(x_1)), (x_2, \mu(x_2)), \dots, (x_n, \mu(x_n))\} \quad x_i \in G \quad (1)$$

Hierin bezeichnet G die Gesamtheit der Objekte und $\mu(x_i)$ die Zugehörigkeit des Elements x zur unscharfen Menge A . Der Form nach sind Regeln als

IF Bedingung1 THEN Resultat1
IF Bedingung2 THEN Resultat2
IF Bedingung3 THEN Resultat3

darstellbar.

Aus den Zugehörigkeitsfunktionen und den Regeln ist ein unscharfes Ergebnis berechenbar. Die hierzu verwendeten Methoden wie: 'Min/Max-Methode', 'Max/Prod-Methode' u.a. sind hinreichend untersucht und in der Literatur veröffentlicht [2]. Für das einfache Beispiel wurde die 'Min/Max-Methode' ausgewählt. Diese Methode ist nicht nur für die Mehrzahl von

Beispielen ausreichend, sondern ist nach [3] die 'natürliche' Methode. Für eine Ausgangsgröße $\mu_{x_1, \dots, x_n}^{output}$ wird folgendermaßen berechnet:

$$\mu_{x_1, x_2, \dots, x_n}^{output} = \max_{r \in 1, \dots, k} \min\{\mu_{i_1, r}^{(1)}(x_1), \dots, \mu_{i_n, r}^{(n)}(x_n)\} \quad (2)$$

Dabei wird das Maximum über alle Regeln $r \in 1, \dots, k$ aus dem Minimum der Und-verknüpften Zugehörigkeitsgrade $\mu_{i_1, r}^{(1)}(x_1) \dots \mu_{i_n, r}^{(n)}(x_n)$ gebildet. Der Einsatz von Oder-Verknüpfungen führt gleichfalls zu einer Bildung des Maximums. Aus den Zugehörigkeiten der einzelnen outputs $\mu_{x_1, \dots, x_n}^{output}$, die im weiteren mit μ_i abgekürzt werden, errechnet sich der Output der Bewertungsgröße y_L wie folgt:

$$y_L = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3)$$

Hier wird davon ausgegangen, daß die Bewertungsgröße als crisp-Werte y_i vorliegen, welches sich für die Behandlung ökologischer Fragestellungen als genügend flexibel erwies.

2.2 Neuronale Netze

Neuronale Netze stehen als Synonym für eine Gruppe von Algorithmen, die kaum noch etwas mit dem natürlichen 'Vorbild' zu tun haben. Diese Algorithmen zeichnen sich durch eine 'Lernfähigkeit' aus, die für Aufgaben wie: Klassifikation, Approximation, Trendvorhersage usw. eine wichtige Grundlage bildet. Für das Einsatzgebiet der Approximation funktionaler Zusammenhänge werden vor allem die Backpropagation- Lernverfahren und die Radial Basis Functions (RBF) eingesetzt. Während die mit dem Backpropagation-Algorithmus trainierten feed-forward-Netze eher einen ausgeglichenen Funktionsverlauf zeigen, also die geforderte Eigenschaft der Kompensation besitzen, sind RBF, ähnlich wie die Fuzzy-Systeme eher für Modellierung robuster Modelle geeignet. Während der Backpropagation-Ansatz genügend in der Literatur [4] vertreten ist und daher hier nicht behandelt wird, soll der hier eingesetzte RBF-Ansatz im Zusammenhang zur Fuzzytheorie näher vorgestellt werden.

2.3 RBF-Ansatz

Der hier vorgestellte RBF-Ansatz geht auf [5] zurück. Als Approximationskurve wurde die Gauß'sche Glockenkurve gewählt:

$$p(x_1, \dots, x_n) = A \times e^{-\frac{(x_1 - x_{10})^2 + \dots + (x_n - x_{n0})^2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

Die "Normierung" der zur Approximation benötigten Glockenkurven führt zu einem Bild, das mit den Funktionverläufen von Zugehörigkeitsfunktionen von Fuzzy-Mengen vergleichbar ist. Die normierte Funktion ergibt sich wie folgt:

$$\tilde{p}_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^k \tilde{p}_i} \quad (5)$$

Eine Summation mit den crisp-Werten y_i der Ausgangsgrößen bildet das Ergebnis des RBF-Ansatzes:

$$y_L = \sum_{i=1}^k y_i \times \tilde{p}_i \quad (6)$$

Betrachtet man das oben vorgestellte Fuzzy-Verfahren im Vergleich zum hier verwendeten RBF-Ansatz so fällt auf, daß beide Verfahren sich nicht wesentlich unterscheiden. Werden die normierten Glockenfunktionen als Fuzzy-Regeln interpretiert, erhält man ein einfaches Verfahren zur Initialisierung des RBF-Ansatzes. Dabei ist zu beachten, daß sowohl die Glockenfunktionen als auch die Ausgabefunktion einem Lernansatz zugänglich sind. Für die Glockenkurven können z.B. Kohonennetze als Grundlage dienen. Die Ausgabefunktion kann mit der 'Delta-Regel' adaptiert werden. Dazu sind die vorgegebenen y_i als variabel anzunehmen. Der hier gezeigte Weg bietet den Vorteil, daß das trainierte Neuronale Netz weiterhin als Fuzzy-Modell interpretierbar bleibt, so einer späteren anschaulichen Diskussion mit dem Fachexperten als Basis dienen kann.

3 Anwendung

3.1 Zugehörigkeitsfunktion zum Gefährdungspotential einer Straße bei der Modellierung eines Schleiereulenhabitats

Für die Modellierung der Gefährdung wurden aus Gründen der Anschaulichkeit nur die zwei linguistischen Variablen: 'Verkehrsdichte' und 'Entfernung zum Nistplatz' herangezogen. Die Verkehrsdichte ist durch das Termset: 'hoch', 'mittel' und 'gering' beschreibbar. Für die Entfernung zum Nistplatz kam das Termset: 'klein', 'mittel' und 'groß' zum Einsatz. Die Zugehörigkeitsfunktion wurde mittels obigen Ansatzes als normierte Glockenkurve gewählt.

Die Regeln wurden im Beispiel sehr einfach gehalten:

IF Verkehr == gering AND Entfernung == gering THEN Gefahr = 0.7

IF Verkehr == gering AND Entfernung == mittel THEN Gefahr = 0.9
IF Verkehr == gering AND Entfernung == groß THEN Gefahr = 1.0
IF Verkehr == mittel AND Entfernung == gering THEN Gefahr = 0.4
IF Verkehr == mittel AND Entfernung == mittel THEN Gefahr = 0.6
IF Verkehr == mittel AND Entfernung == groß THEN Gefahr = 0.75
IF Verkehr == groß AND Entfernung == gering THEN Gefahr = 0.0
IF Verkehr == groß AND Entfernung == mittel THEN Gefahr = 0.1
IF Verkehr == groß AND Entfernung == groß THEN Gefahr = 0.55

Die Werte für die Gefahr sind entsprechend obigen Voraussetzungen crisp, wobei 1.0 für ausgezeichnet und 0.0 für unbrauchbar steht. In Abbildung 1 wurde das Verhalten dargestellt.

4 Kompensation

Die Kompensation bildet einen gewissen Gegenpol zur Robustheit. Das Modell muß schon auf recht kleine Änderungen reagieren. Sinnvollerweise wird eine Kompensation dann gefordert, wenn nicht wie beim Fuzzy-Modell elementare Prozesse betrachtet werden, sondern wenn höheraggregierte Eingangsgrößen untersucht werden. In diesem Bereich der Modellbildung haben ausgleichende Vorgänge die Oberhand gegenüber hohen Nichtlinearitäten der elementaren Prozesse.

4.1 Modellierung mit neuronalen Netzen

Neuronale Netze, die nach dem Backpropagation-Algorithmus trainiert werden, besitzen die 'Fähigkeit zur Generalisierung von Wissen'. Gerade diese Fähigkeit erlaubt es erst, unbekannte Strukturen zu erkennen. Wird als Ziel einer Modellierung die Ermittlung 'minimaler' Strukturen angesehen, so führt dieses Kriterium zu einer Einschränkung des Raumes möglicher Netzstrukturen. Erst bei zu schlechten Anpassungen der Modelle ist die Netzstruktur zunehmend komplexer zu gestalten. Das geschieht dann in der Regel durch eine steigende Zahl von Hiddenelementen. Dieser Ansatz führt, wenn er mit einer Vermeidung des 'Übertrainierens' von Netzen einhergeht, zu robusten Modellen, die Unsicherheiten in den Ausgangsdaten recht gut tolerieren.

Abbildung 2 zeigt eine Kennlinie eines trainierten Neuronalen Netzes. Deutlich sind die 'sanfteren' Übergänge zu erkennen. Anhand der Höhenlinien ist die Fähigkeit zur Kompensation nachvollziehbar. Verändert sich

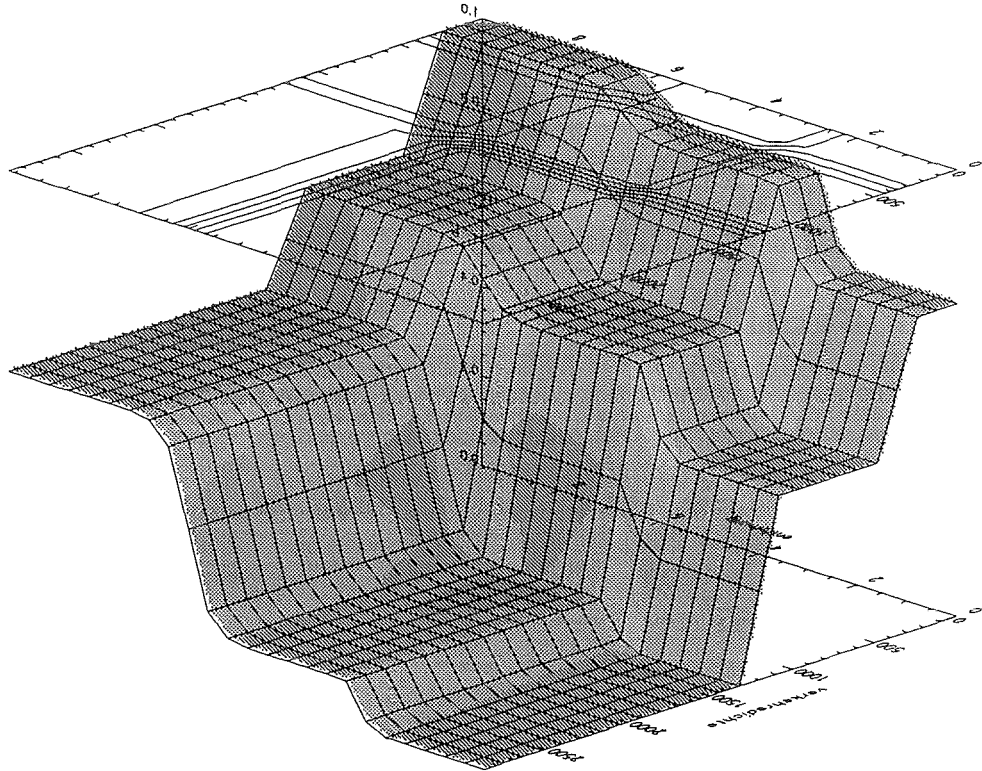


Abbildung 1: Gefahr als Funktion der Verkehrsdichte und Entfernung, deutlich sind die Plateaus zu erkennen, die die Robustheit gegenüber kleinen Schwankungen der Eingangsgrößen bewirken. Bei Überschreitung der Grenzen erfolgt dann aber auch eine drastische Reaktion.

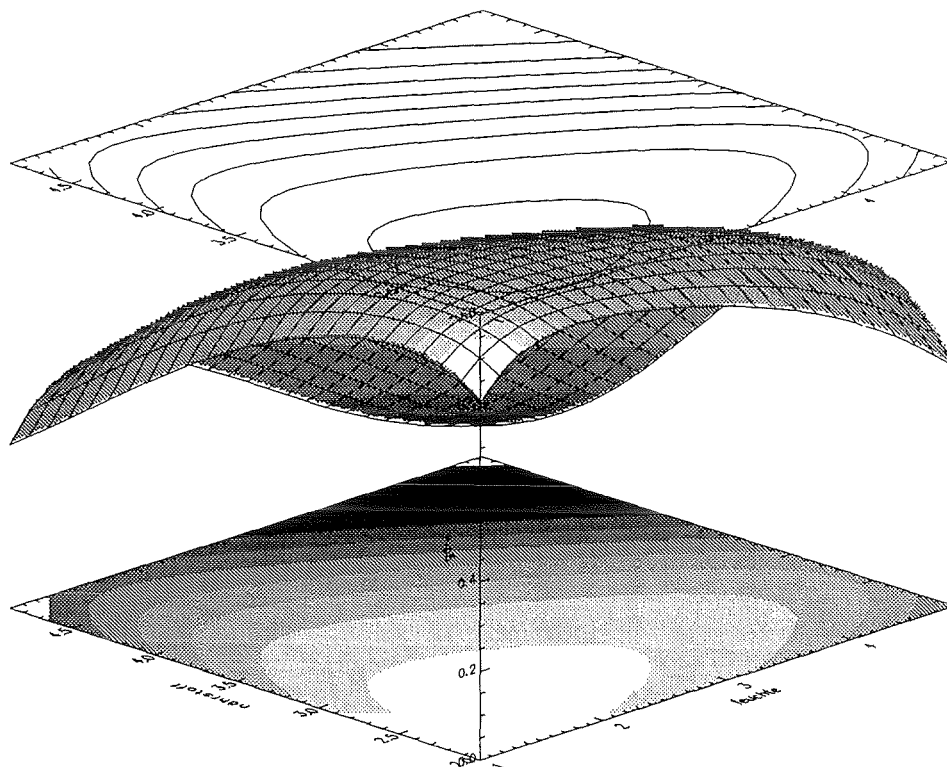


Abbildung 2: Kennlinie eines trainierten Neuronalen Netzes, hier im Beispiel der Lebensraumgüte von *Medicago minima* bzgl. der Einflußgrößen Nährstoff (oligotroph=2 zu eutroph=5) und Feuchte (trocken=1 zu feucht=5)

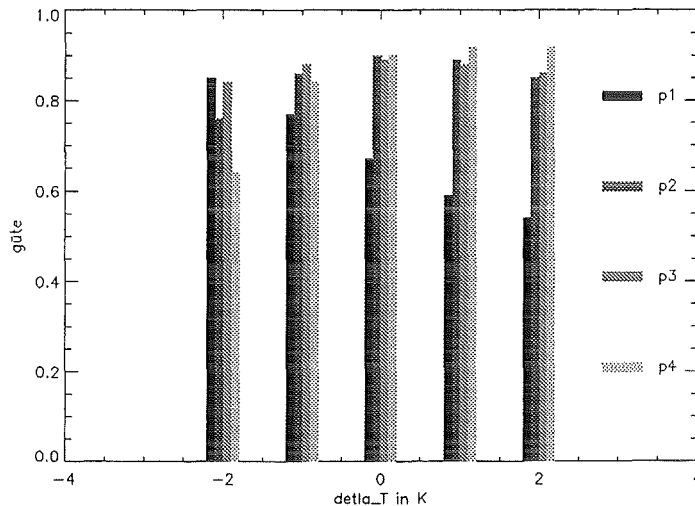


Abbildung 3: Lebensraumgüte in Abhängigkeit der Jahresmitteltemperatur, p1=*Carex limosa*, p2=*Carex disticha*, p3=*Stipa capillata*, p4=*Medicago minima*

eine Eingangsgröße in Richtung Verschlechterung, kann durch die andere Eingangsgröße dieses (in Grenzen) kompensiert werden.

4.2 Modellierung der Lebensraumgüte indigener Pflanzen

Im Raum "Märkische Schweiz" wurden Untersuchungen zu Lebensbedingungen wildlebender Pflanzen durchgeführt. Aus dem Vorkommen der Pflanzen unter lokal herrschenden Klima- und Standortbedingungen wurden mittels Neuronaler Netze, einfache aber robuste Modelle entwickelt. Der Fuzzyansatz war hier nur bedingt anwendbar, da zwar eine große Zahl von Daten über diese Pflanzen in einer Datenbank vorlagen, konkrete Zugehörigkeiten standen nicht in genügender Qualität zur Verfügung. Da es auch hier vor allem um ein 'weiches' Verhalten des Modells geht, wurde der Backpropagation-Algorithmus gewählt. Die Abbildung 3 zeigt den Einfluß einer möglichen Temperaturveränderung auf ausgewählte Pflanzen, bei Konstanz der weiteren Parameter:

Auch wenn die Verschiebung der Lebensraumgüte noch nicht so gravierend ausfällt, wie es bei einer kombinierten Veränderung der Jahresmittel-

temperatur und der Feuchte ausfallen würde (was auch realistischen Klimamodellen entspräche), so zeigt doch die Graphik eine Verschiebung der Dominanzverhältnisse der Pflanzenarten im Gebiet.

5 Schluß

Der Einsatz von Fuzzy-Methoden und Neuronalen Netzen erlaubt eine Modellierung auch in Bereichen, die einer traditionellen Modellierung bisher verschlossen waren. Die mit diesen Methoden erzeugten Modelle, können bei der Bewertung von Landschaften unter heutigen oder zukünftigen Bedingungen herangezogen werden. Ein weiteres Einsatzgebiet dieser Modelle ergibt sich aus der algorithmischen Behandelbarkeit der inversen Problemstellung. D.h. der Abschätzung von Parametern bei einer Zielvorgabe für die Güte.

In weiteren Untersuchungen wird angestrebt, den RBF-Ansatz zu einer allgemein anwendbaren adaptiven Methode weiterzuentwickeln.

Literatur

- [1] R.Wieland, A.Schultz, G.Lutze: "Habitatsmodelle im Rahmen der dynamischen Landschaftsmodellierung", in Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5622, 1995, S.95-105
- [2] H.Traeger: "Einführung in die Fuzzytheorie", B.G. Teubner, Stuttgart, 1994
- [3] M.Peschel: "Der Taoismus in Religion und Wissenschaft", in: Seminar Systemwissenschaften Report 9, TU Chemnitz, 1995
- [4] D.Nauk, F.Klawonn, R.Kruse: "Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme", Vieweg Verlag, Braunschweig, 1994
- [5] R.Brause: "Neuronale Netze", B.G.Teubner, Stuttgart, 1995



5 Neuronale Netze im Umweltbereich

Keller, H. B., Kugele, E., Müller, B.,
große Osterhues, B.

Neuronale Netze im Umweltbereich

H. B. Keller, E. Kugele, B. Müller, B. große Osterhues
Arbeitsgruppe Innovative Prozeßführungssysteme und -verfahren - INPRO
Forschungszentrum Karlsruhe - Technik und Umwelt
Institut für Angewandte Informatik
Postfach 3640,
76021 Karlsruhe

e-mail: keller@iai.fzk.d400.de

Abstract

Neuronale Netze stellen eine interessante und leistungsfähige Methode für viele Anwendungsbereiche dar (z. B. Modellierungs- und Steuerungsaufgaben, gerade auch im Umweltbereich). Beginnend mit der historischen Entwicklung werden die Eigenschaften neuronaler Netze, sowie Werkzeuge zur Simulation erläutert. Danach erfolgt eine Erläuterung von Einsatzmöglichkeiten im und eine Darstellung von Anwendungen aus dem umwelttechnischen Bereich. Zusammenfassend werden die Grenzen neuronaler Netze, aber auch deren Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

1 Einleitung

Umwelttechnische Belange erfordern Modelle (Verständnis) über den Aufbau und das Verhalten komplexer natürlicher oder umweltrelevanter technischer Systeme. Komplexe Umwelt- oder Prozeßmodelle beinhalten natürlicherweise aber eine hohe Anzahl von Parametern, Vernetzungen zwischen Systemgrößen und massive Nichtlinearitäten berücksichtigen. Solche Zusammenhänge können über eine theoretische Modellbildung oft nicht abgeleitet werden, der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen bietet sich damit an.

Für den Anwender stellen künstliche neuronale Netze Verfahren dar, welche ihm Lösungen auch in Bereichen liefern können, in denen die klassischen Ansätze versagen. Neuronale Netze sind "lernende Verfahren", die dem Bereich des Machine Learning, einem Teilbereich der Artificial Intelligence (Künstlichen Intelligenz, AI oder KI), zugeordnet werden. Neuronale Netze sind geeignet, einen vorhandenen und irgendwie gear-teten Lösungsprozeß über ein Training anhand vorgegebener Beispieldaten zu lernen. Neuronale Netze sind dabei Systeme aus vielen, einfachen und gleichartigen Bausteinen, zwischen denen gerichtete Verbindungen existieren. Diese Verbindungen sind gewichtet, d. h. mit numerischen Werten versehen. Lernen erfolgt in einem neuronalen Netz durch die Veränderung der Verbindungsgewichte zwischen den verschiedenen Bausteinen oder durch direkte Strukturveränderungen. Das gelernte "Wissen" ist in ei-

nem neuronalen Netz somit implizit in den Verbindungsstrukturen und deren Gewichten enthalten. Für eine über die folgende Darstellung hinausgehende Betrachtung sei auf die Literatur verwiesen (/16/, /12/).

2 Neuronale Netze

Neuronale Netze lassen sich durch ihre Architektur und ihr operationales Verhalten charakterisieren. Dabei bilden die künstlichen neuronalen Netze nur sehr elementare Eigenschaften ihrer biologischer Vorbilder, den natürlichen neuronalen Strukturen, nach. Unter dem Begriff der **Architektur** sind die Art der Bausteine, der Neuronen mit ihren internen Eigenschaften und die Struktur des Netzes (die Art der Verbindungen) zu verstehen. Das **operationale Verhalten** eines neuronalen Netzes wird durch

- den Berechnungszeitpunkt für jedes Neuron (synchron/asynchron)
- die Informationsflußrichtung (vorwärts/rückgekoppelt (rekurrent))
- das Vorhandensein eines internen Gedächtnis im Neuron (Sättigung, Abhängigkeit der Reaktion auf Eingangssignale von Vergangenheitswerten)
- das Lernprinzip (überwacht/nicht-überwacht) und
- das Lernproblem (diskret, kontinuierlich)

charakterisiert. Entsprechend der Problemstellung einer Anwendung ergeben sich die grundsätzlichen Schritte in der Entwicklung von neuronalen Netzen:

1. Definition der Netzstruktur, der Neuronen und der Trainingsdaten
2. Training und Validierung des neuronalen Netzes, mit jeweils nicht korrelierten Datensätzen
3. Einsatz des neuronalen Netzes in der Anwendungsphase

2.1 Historische Entwicklung

Von McCulloch und Pitts wurde im Jahre 1943 das Modell eines Neurons vorgestellt, das einige logische Funktionen realisieren konnte. Es handelt sich um ein binäres Schwellenwert-Neuron (Abb. 1). Die X_i , Y_i sowie der Ausgangswert O sind aus der Menge $(0,1)$. Die X_i sind dabei erregend, die Y_i absolut hemmend. Der griechische Buchstabe Θ bezeichnet den Schwellenwert des Neurons. Besitzt ein Y_i den Wert 1, so wird das Neuron inaktiv, sein Ausgangswert ist 0. Sind alle Y_i Null und die Summe aller X_i größer gleich dem Schwellenwert Θ , so ist der Ausgangswert 1, andernfalls gleich 0. Mit diesem Neuron als Baustein lassen sich die elementaren logischen Funktionen nachbilden.

Rosenblatt stellte 1958 ein Neuronenmodell, das **Perzeptron**, vor (Abb. 2). Dieses Neuronenmodell verarbeitet gewichtete Informationen parallel. Hintergrund war die Nachbildung von senso-motorischen Vorgängen. Das Perzeptron besteht aus 3 Ebenen, der Sensor(S)-Ebene, der Assoziations(A)-Ebene und der Response(R)-Ebene. Die R-Ebene besteht in der Regel nur aus einem Neuron. Das Perzeptron verarbeitet gewichtete, binä-

re Signale und besitzt eine Schwellenwertfunktion. Der Ausgang ist wiederum binärwertig. Lernen findet zwischen den A-R-Ebenen (Verbindungen) statt.

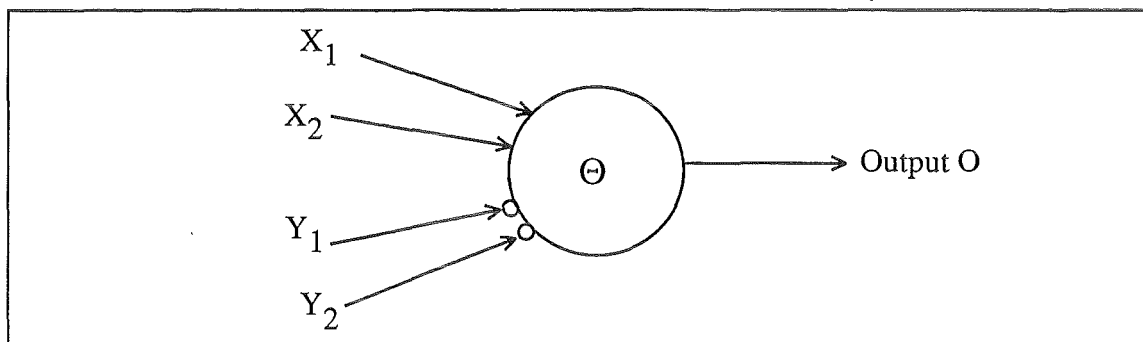


Abb. 1: McCulloch-Pitts-Neuron

Das Perzeptron (eigentlich das R-Neuron) kann einige elementare logische Funktionen nachbilden, scheitert aber an der XOR-Funktion (eXclusive-OR, siehe Abb. 3). Am Beispiel der AND-Funktion bzw. OR-Funktion sieht man die Fähigkeit dieses Neurons, zwei Bereiche im Eingangsraum durch eine Gerade zu trennen (lineare Separierung). Zur Realisierung der XOR-Funktion sind aber drei Bereiche im 2-dimensionalen Eingangsraum zu trennen, dies kann das Perzeptron nicht (Abb. 4).

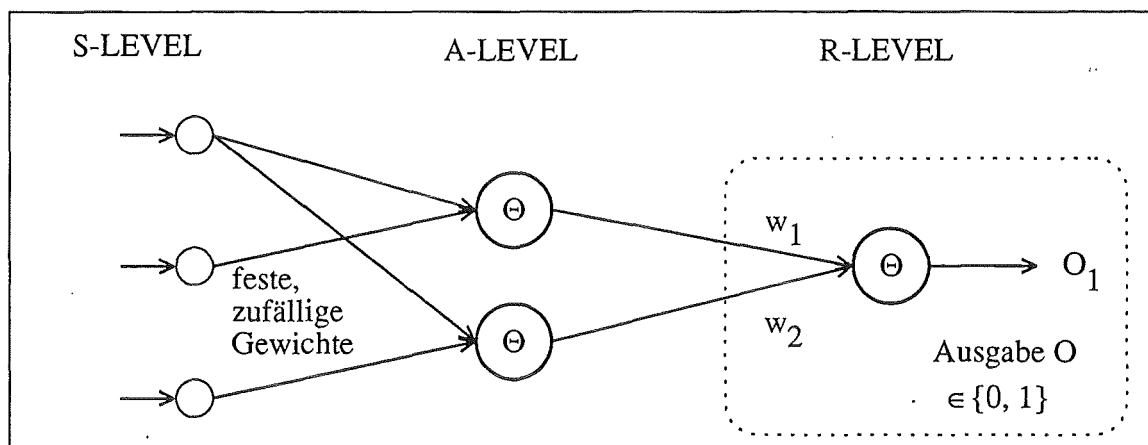


Abb. 2: Das Perzeptron

Um die in Abb. 3 dargestellte XOR-Funktion mit Hilfe eines Perzeptron mit festem Schwellenwert $\Theta > 0$ zu lösen, müssen die reellwertigen Gewichte w_1 und w_2 (vgl. Abb. 2 und 3) die folgenden vier Ungleichungen erfüllen:

$$0 * w_1 + 0 * w_2 < \Theta \Rightarrow 0 < \Theta$$

$$0 * w_1 + 1 * w_2 > \Theta \Rightarrow w_2 > \Theta$$

$$1 * w_1 + 0 * w_2 > \Theta \Rightarrow w_1 > \Theta$$

$$1 * w_1 + 1 * w_2 < \Theta \Rightarrow w_1 + w_2 < \Theta$$

($\Theta > 0$ ist der Schwellenwert, ab dem das Perzeptron eine Ausgabe erzeugt.)

Aufgrund der ersten Ungleichung ist die Wahl von $\Theta > 0$ zwingend. Aus den Ungleichungen 2 und 3 folgt, daß die beiden Gewichte w_1 und w_2 größer als Θ sein müssen. Wenn die Gewichte w_1 und w_2 jedoch größer als Θ sind, so kann ihre Summe nicht kleiner als Θ sein (Ungleichung 4). Somit ist dieses Ungleichungssystem nicht lösbar, mithin ist die XOR-Funktion durch ein Perzeptron nicht berechenbar.

Eingabe-Muster (x_1 / x_2)		Ausgabe-Muster
0 0	→	0
0 1	→	1
1 0	→	1
1 1	→	0

Abb. 3: Die XOR-Funktion

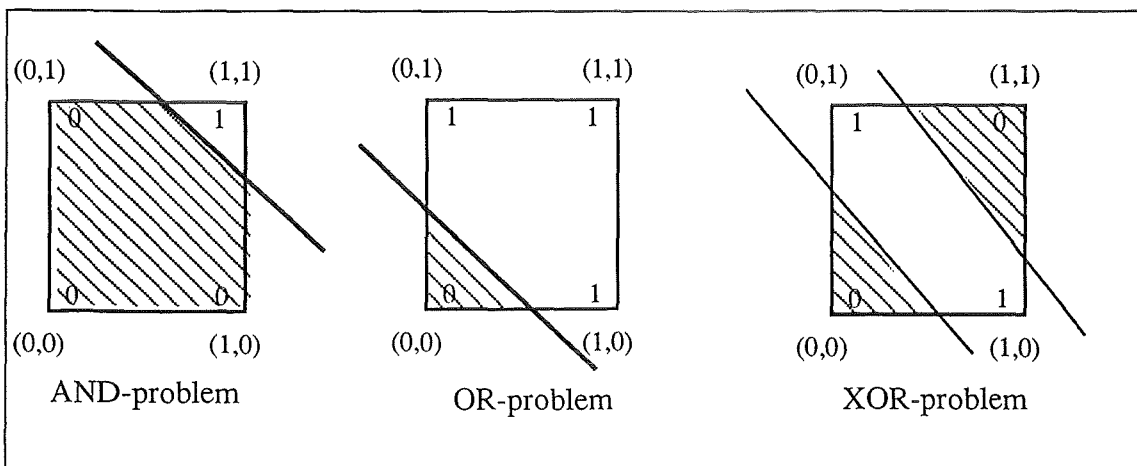


Abb. 4: AND-, OR- und XOR-Problem

Minsky und Papert wiesen 1969 nach, daß Perzeptrons mit nur einer Ein- und einer Ausgabeschicht prinzipiell nicht im Stande sind, räumliche zusammenhängende Figuren in vorgegebenen Mustern zu berechnen. Es war ihnen jedoch bekannt, daß durch neuronale Netze mit mindestens einer verborgenen Schicht derartige Probleme gelöst werden können. Zu diesem Zeitpunkt war jedoch keine Verallgemeinerung des Perzeptron-Lernverfahrens auf mehrschichtige Netze bekannt. Da Minsky und Papert nicht an die Existenz eines solchen glaubte, verlor sich das Interesse an neuronalen Netzen, bis Hopfield, Rumelhart sowie Kohonen mit neuen Ansätzen die weitergehenden Möglichkeiten neuronaler Netze aufzeigten. Vor allem eine Lernregel für mehrschichtige Netze, die Error-Back-Propagation-Regel, war ein wichtiger Schritt in Richtung komplexerer, lernfähiger Netze. Die eigentliche Lösung des XOR-Problems war bekannt und ist durch das in Abb. 5 dargestellte einfache Netz mit einer verdeckten Schicht (hidden layer) gegeben.

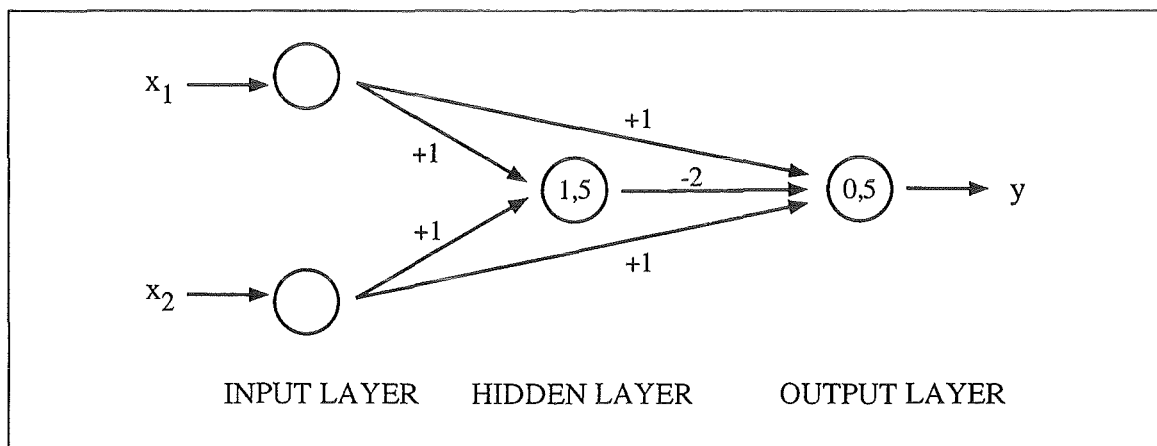


Abb. 5: Lösung des XOR-Problems

2.2 Grundmodell eines Neurons

Das Grundmodell eines Neurons (Abb. 6) stützt sich im wesentlichen auf die Vereinfachung von McCulloch und Pitts aus dem Jahre 1943, die ein Neuron als eine Art **Addierer mit Schwellenwert** betrachten (mehrere Eingänge, aber nur einen Ausgang). Mathematisch kann man die Input-Signale und die Gewichte als Vektoren (x_1, x_2, \dots, x_n) und (w_1, w_2, \dots, w_n) auffassen. Die Berechnung des gesamten Input-Signals erfolgt mit Hilfe einer **Summationsfunktion** (net), z. B. die gewichtete Summe, d. h. dem euklidischen Skalarprodukt der beiden Vektoren, was geometrisch als ein Maß für die Ähnlichkeit dieser beiden Vektoren aufgefaßt werden kann.

Ein weiterer Prozeß im Neuron betrifft die **Aktivierungsfunktion** (a). Das Ergebnis der Summationsfunktion kann als Argument für eine Aktivierungsfunktion dienen, die daraus den **Aktivierungswert** berechnet und diesen dann an die Übertragungsfunktion weiterleitet. Der Sinn der Aktivierungsfunktion besteht darin, daß sie es ermöglicht, die

Ausgabe in Abhängigkeit von der Zeit zu variieren. Die Aktivierungen früherer Zeitpunkte geben dem Neuron ein Gedächtnis, mit dem beispielsweise Adaption modelliert werden kann. Eine weitere Funktion ist die **Output-Funktion** (out), zur eigentlichen Erzeugung des Ausgangssignals. Wenn die gewichtete Summe der Input-Signale größer als der Schwellenwert ist, dann erzeugt das Neuron ein Signal. Falls das Ergebnis der Summationsfunktion kleiner als der Schwellenwert ist, so wird kein Signal (oder ein hemmendes Signal) erzeugt; beide Antworten sind signifikant. Die normalerweise üblichen Übertragungsfunktionen sind Treppenfunktionen oder sigmoide Funktionen. Allgemein wird für die Aktivierungsfunktion die **Identität** verwendet, wobei die Bezeichnungen für die Aktivierungsfunktion und Outputfunktion in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet werden.

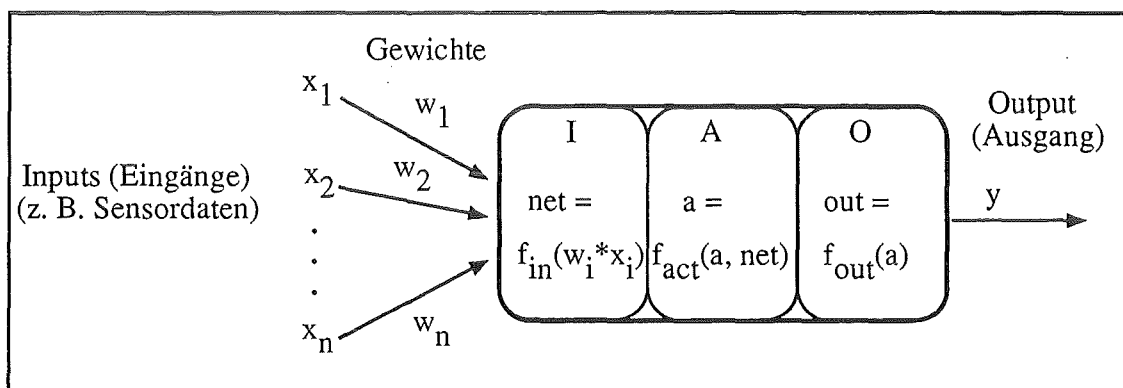


Abb. 6: Grundmodell eines künstlichen Neuron

2.3 Anordnung der Neuronen in Schichten

Ein neuronales Netz besteht üblicherweise aus einer größeren Anzahl an Neuronen. Zur Strukturierung werden Neuronen mit gleicher (paralleler) Funktion zu einem Funktionsblock (einer **Schicht, Layer**) zusammengefaßt. Die einzelnen Schichten werden in einer Folge "nacheinander" angeordnet und in geeigneter Weise miteinander verbunden. Schichten, die weder aus Eingabe- noch aus Ausgabeeinheiten bestehen, werden als **verdeckte Schichten (hidden Layer)** bezeichnet. Die erste Schicht eines Netzes enthält die Eingabeeinheiten und dient ausschließlich der Verteilung der Eingabesignale.

Für die Richtung der Verbindungen und damit des Informationsflusses kann man grundsätzlich die folgenden Formen unterscheiden:

- **Feed-forward** (vorwärts gekoppelte) Netze:
Die Eingänge einer Schicht werden ausschließlich von den Ausgängen der Schicht davor gespeist, d. h. die Neuronen einer Schicht haben keinerlei Einfluß auf einander und auf davorliegende Schichten.
- **Rekurrente** (feed-back, rückgekoppelte) Netze:
In rekurrenten Netzen kann jedes Neuron mit sich oder mit jedem anderen Neuron des Netzes verbunden sein. Es handelt sich somit um Netzwerke, die Verbindungen

dungen und damit eine Informationsverarbeitung in alle Richtungen (d. h. auch Querverbindungen und Rückkopplungen) zulassen.

2.4 Lernen in neuronalen Netzen

In der Regel muß ein neuronales Netz seine Zielfunktion über Beispieldaten durch die Anpassung der Gewichte erlernen. Grundsätzlich kann man die verschiedenen Lernansätze nach dem Ursprung der zu erlernenden Muster einteilen (ähnlich dem Lernen aus Beispielen, vgl. /14/). Hierzu unterscheidet man:

1. **Überwachtes Lernen:**

(supervised learning)

Beim überwachten Lernen müssen dem neuronalen Netz zum Trainieren Eingabe- und Ausgabedaten präsentiert werden (Trainingsmenge); d. h. zu jedem gegebenen Eingabemuster präsentiert man dem neuronalen Netz das gewünschte vorgegebene Ausgabemuster.

2. **Nicht-überwachtes Lernen:**

(unsupervised learning)

Im Gegensatz zum überwachten Lernen benötigen neuronale Netze beim nicht-überwachten Lernen keine externe Beeinflussung durch ein vorgegebenes Ausgabemuster zum Auslösen einer Anpassung ihrer Gewichte. Dafür verfügen sie über eine interne Möglichkeit (ein Optimierungskriterium, globales Gütekriterium) um ihre Performanz zu überwachen.

Das Wissen wird in neuronalen Netzen durch die Gewichte der Verbindungen und die spezifischen Funktionen der einzelnen Neuronen gespeichert. Im Gegensatz zu symbolischen Verfahren, bei denen einzelne Objekte über Symbole direkt bezeichnbar und benennbar sind, werden in einem neuronalen Netz die Objekte über ihre Eigenschaften repräsentiert. Die Eingangsinformation des Netzes stellt die wertemäßige Ausprägung der Eigenschaften (Merkmalsmenge/Attribute) der einzelnen Objekte dar. Über einen Lernvorgang kann diese Information in eine interne Repräsentation überführt werden. Da die Beziehung zwischen interner Repräsentation eines Objektes und seiner externen symbolischen Bezeichnung in aller Regel nicht eindeutig ist, spricht man von subsymbolischer Repräsentation (Ebene unterhalb der symbolischen Form). Eine eindeutige Zuordnung ist in aller Regel auch nicht das Ziel des Lernvorgangs, es wird vielmehr versucht eine abstrakte Fassung der angebotenen Informationen zu lernen (Klassen der Eingangsmuster). Damit kann das Netz auch auf Eingaben reagieren, die sich von den gelernten unterscheiden und eine korrekte Klassifikation durchführen oder eine approximative Antwort berechnen. Je nach Struktur des neuronalen Netzes und der dargebotenen Eingabewerte als Eigenschaftsausprägungen der zu lernenden Objekten erfolgt eine mehr oder weniger verteilte Repräsentation dieser Objekte über die am Lernvorgang beteiligten Neuronen. Wegen der verteilten Repräsentation und damit einer konkurrierenden Bereichszuständigkeit zeichnen sich bestimmte neuronale Netzarten neben einer hohen

Fehlertoleranz auch durch ein gutes Näherungsverhalten aus (Bildverarbeitung, Musterklassifikation bei verrauschten Daten, Mustervervollständigung). Die Informationsverarbeitung in einem neuronalen Netz muß nicht sequentiell erfolgen. Die einzelnen Verarbeitungselemente des neuronalen Netzes können nebenläufig ausgeführt werden. Voraussetzung für eine effiziente Parallelisierung ist die Lokalität bei der Verarbeitung in den einzelnen Neuronen. Diese wird durch entsprechende Funktionen gewährleistet (gewichtete Summation /16/). Auf einem Mehrprozessorsystem werden die Neuronen echt **parallel** tätig (in Abhängigkeit des Informationsflusses).

2.5 Netzmodelle

2.5.1 Multi-Layer-Perzeptrons (MLP, Backpropagation-Netze)

Die grundlegende Idee des Backpropagation-Algorithmus liegt in der Verbindung eines neuronalen Netzes (MLP) auf der Basis von Perzeptrons mit einer nicht-linearen Schwellenwertfunktion und einem Gradientenverfahren.

Back-Propagation ist eine Verallgemeinerung der Delta-Regel auf Netzwerke mit beliebig vielen Schichten und einer feed-forward-Verarbeitung. Jedes Neuron enthält eine kontinuierliche sigmoide Ausgabefunktion mit Werten aus dem Intervall $[0, 1]$ (z. B. Fermifunktion $\sigma(x) = (1 + \exp(-x))^{-1}$). Das Backpropagation-Lernverfahren gliedert sich in 3 Schritte:

1. Das in der Eingabeschicht angelegte Muster wird in Richtung Ausgabeschicht propagiert (durchlaufen), um dort die Reaktion des Netzes auf das präsentierte Muster zu generieren. Die Ausbreitung durch das Netz erfolgt schichtweise, d. h. die Aktivierungen der Neuronen werden zuerst in jener verdeckten Schicht berechnet, die der Eingabeschicht am nächsten liegt. Dann erfolgt die Berechnung der Aktivierung der nächsten, näher zur Ausgabeschicht hin gelegenen Schicht, bis schließlich die Ausgabeschicht selbst erreicht wird.
2. Dann erfolgt die Fehlerbestimmung wiederum schichtweise. Dabei wird bei der Ausgabeschicht begonnen, da hier das gewünschte Muster zur Verfügung steht (überwachtes Lernen) und mit dem tatsächlichen vom Netz produzierten Muster verglichen werden kann. Aus der Differenz dieser beiden Muster wird das Fehler-signal für die Ausgabeschicht gebildet, von dem auch die Berechnung der weiteren Fehler-signale für die in Richtung Eingabeschicht liegenden jeweils nächsten Schichten (verdeckte Schichten und Eingangsschicht) abhängt.
3. Wurde der Fehler bis zur letzten verdeckten Schicht zurückgesendet, so erfolgt abschließend die Gewichts-anpassung ausgehend von der Eingangsschicht bis zur Ausgangsschicht, abhängig vom Grad der jeweiligen Fehlerwerte.

Nach der Gewichtsänderung kann ein weiteres Muster angelegt und vorwärts propagiert werden. Wendet man diese Lernprozedur wiederholt an, so wird der vom Netz verursachte Fehler schrittweise verringert. Da es sich bei dem Back-Propagation Algorithmus um ein Gradientenverfahren handelt, kann sich das neuronale Netz in einem lokalen

Minimum verfangen und die gestellte Aufgabe nicht fehlerfrei erlernen.

Backpropagation-Netze sind in der Art der Berechnung des Ausgabewertes normalerweise reine feed-forward Netze. Verschiedene Weiterentwicklungen versuchen über Rückkopplungen zwischen den verschiedenen Schichten zeitliche Abhängigkeiten in den Eingangsdaten zu modellieren (z. B. Elman-Netze, Jordan-Netze). Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit der Fehler der einzelnen Beispieldaten ist für diese Netze ein hoher Speicheraufwand bei nur langsamem Lernverhalten nötig. Sinnvollerweise sollte man Vergangenheitswerte direkt über zusätzliche Neuronen in der Eingabeschicht berücksichtigen.

2.5.2 Kohonen-Netze

Basis des neuronalen Netzmodells nach Teuvo Kohonen (1984) ist die Annahme, daß die Neuronen im Gehirn entsprechend ihrer räumlichen Lage zueinander in bestimmter Weise zusammenarbeiten (benachbarte Neuronen bzw. Neuronengruppen reagieren auf benachbarte Reize). Bei jedem Eingangssignal wird das Neuron gesucht, das auf die Eingabe am stärksten reagiert (Erregungszentrum); es ist damit automatisch dem Eingangssignal am nächsten (ähnlichsten bzgl. einer zugrundeliegenden Metrik). Dieses Neuron ändert seine Gewichte entsprechend der Lernregel in Richtung des Eingabesignals. Die Werte aller anderen Neuronen werden entsprechend der Lernregel und ihres Abstandes zu dem Erregungszentrum geändert (Nachbarschaftsbeziehung). Kohonen-Netze können einen höherdimensionalen Eingaberaum, unter teilweiser Erhaltung von Nachbarschaftsrelationen, auf eine niederdimensionale Karte abbilden (ähnlichkeitserhaltend). Ein wichtiger Faktor der Lernregel ist die Erregungsfunktion, denn durch sie fließt die Nachbarschaftsbeziehung in das Lernverfahren ein. Die Erregungsfunktion legt fest, wie stark ein Neuron am Lernvorgang beteiligt werden soll. Dies wird durch den (euklidischen) Abstand eines bestimmten Neurons zum Erregungszentrum festgelegt. Die Funktion nimmt ihr Maximum an, wenn das aktuelle Neuron gleich dem Neuron des Erregungszentrum ist.

2.6 Werkzeuge zur Simulation neuronaler Netze

2.6.1 Allgemeine Software

Hinsichtlich der Nutzer neuronaler Netz-Software kann grob in 2 Klassen unterschieden werden:

- Nutzer von Standardmodellen, Einsatz von neuronalen Netzen für klar umrissene Aufgaben,
- Experte/Entwickler von Modellen, spezielle Zielstellungen, intensive Nutzung.

Für den ersteren Anwender bietet sich ein interaktiver Tool mit den gängigen Netz-Modellen und Vorgaben für die neuronale Netz-Parameter als Standardwerte an. Für

den späteren effizienten Einsatz des trainierten Netzes sollte die Software auch als integrierbare Funktionsbibliothek verfügbar sein. Der Experte wird im Hintergrund sicherlich auch mit einem interaktiven Tool arbeiten, er benötigt aber unbedingt eine "offene Funktionsbibliothek" mit Erweiterungs-, Modifikations- und Tuningsmöglichkeiten (spezielle Lernverfahren und Netzstrukturen). Die Visualisierung sollte als getrennter, modifizierbarer Baustein vorhanden sein.

Spezielle Funktionen zur Performance-Überwachung und -Steigerung müssen vorhanden oder integrierbar sein (lokale vs. verteilte Repräsentation, Optimierung über *neuron pruning* usw. /3/). Die Komplexität neuronaler Netze (z. B. Backpropagation-Netze) kann über einen Komplexitätsterm in der Zielfunktion, welcher die Verbindungskomplexität beschreibt, minimiert werden. Andere Verfahren versuchen eine Gewichtsabnahme beim Lernen zu erzwingen, um die Verbindungen mit sehr kleiner Stärke zu entfernen. Dies führt dann zum Ausdünnen des Netzes (hidden und evtl. input layer), indem Neuronen mit einem sehr geringen Anteil an der Netzantwort entfernt werden. Neuronen mit synchroner Aktivität (gleiche Ausgabe bei allen Eingaben) können zusammengefaßt werden. Allerdings darf die Gefahr einer Spezialisierung und damit einer schlechten Generalisierung und einer geringen Fehlertoleranz nicht übersehen werden.

Die Entwicklung von neuronalen Netzen über genetische Algorithmen ist ein weiterer Aspekt für den erfahrenen Anwender. Programmsysteme wie der SNNS (Stuttgarter Neuronale Netz Simulator) bieten mittlerweile eine hohe Zahl verschiedener Verfahren integriert an /21/.

Ein allgemeiner Aspekt ist die Portabilität der Entwicklungsumgebung oder von Funktionsbausteinen (einschl. Graphik) auf evtl. Zielrechner. Im Bereich der Prozeßautomatisierung ist auch die Frage der Echtzeitfähigkeit (Zeit-/Speicherperformance) relevant. Eine Übersicht bzgl. existierender Software ist in /7/ zu finden. Im folgenden wird ein spezielles Werkzeug für den Einsatz neuronaler Netze unter Echtzeitbedingungen kurz dargestellt.

2.6.2 X-Executive (eXperiment-Executive)

Das X-Executive-System zur Entwicklung und Anwendung verschiedener Methoden (neuronale Netze, Bildverarbeitung usw.) in einer Echtzeitumgebung wurde mit Ada und X-Windows realisiert (siehe Abb. 7 und /8/). Es besitzt eine verteilte Kommunikationsstruktur, eine graphische Benutzerschnittstelle XM_View und ein Zeitreihenverwaltungssystem. In der Anwendungsphase wird für jede neuronale Netz-Applikation eine entsprechende Ada-Task mit Schnittstellen zum technischen Prozeß generiert.

2.6.3 Hardware

Neuronale Netze bestehen aus vielen, relativ einfachen, miteinander vernetzten Verarbeitungseinheiten (Neuronen), eine physikalisch parallele Berechnung bietet sich an. Bei den Hardware-orientierten Ansätzen können folgende Vorgehensweisen unterschieden werden:

- Hardware-Erweiterung für PC oder Workstation
- Parallelrechnersysteme (massiv parallel)
- spezielle Neuro-Hardware (primär digital)
- optische / opto-elektronische Realisierung (Zukunftsvision)

Wichtige Größen bei neuronale Netz-Hardware sind die Größe des Gewichtsspeichers, die Einheitsberechnungen in der Lernphase (connection updates per second - CUPS) und in der Anwendungsphase (connections per seconds - CPS). Spezielle ASICs (anwendungsspezifische ICs) für neuronale Netze leisten 10^9 CUPS, das entspricht der Verarbeitung von 10^3 Eingänge/Gewichte für 10^3 PE's in 10^3 Schichten innerhalb 1 Sekunde bei Kosten 10^{-4} \$ pro CUPS. Rechner auf Standard-VLSI leisten etwa 10^6 bis 10^7 CUPS bei einem Preis von 10^{-1} \$ pro CUPS. Die Verwendung von Spezial-Hardware lohnt sich dementsprechend nur bei intensiver Anwendung oder hardwarenaher Realisierung. Ausführlichere Betrachtungen sind in /17/ zu finden.

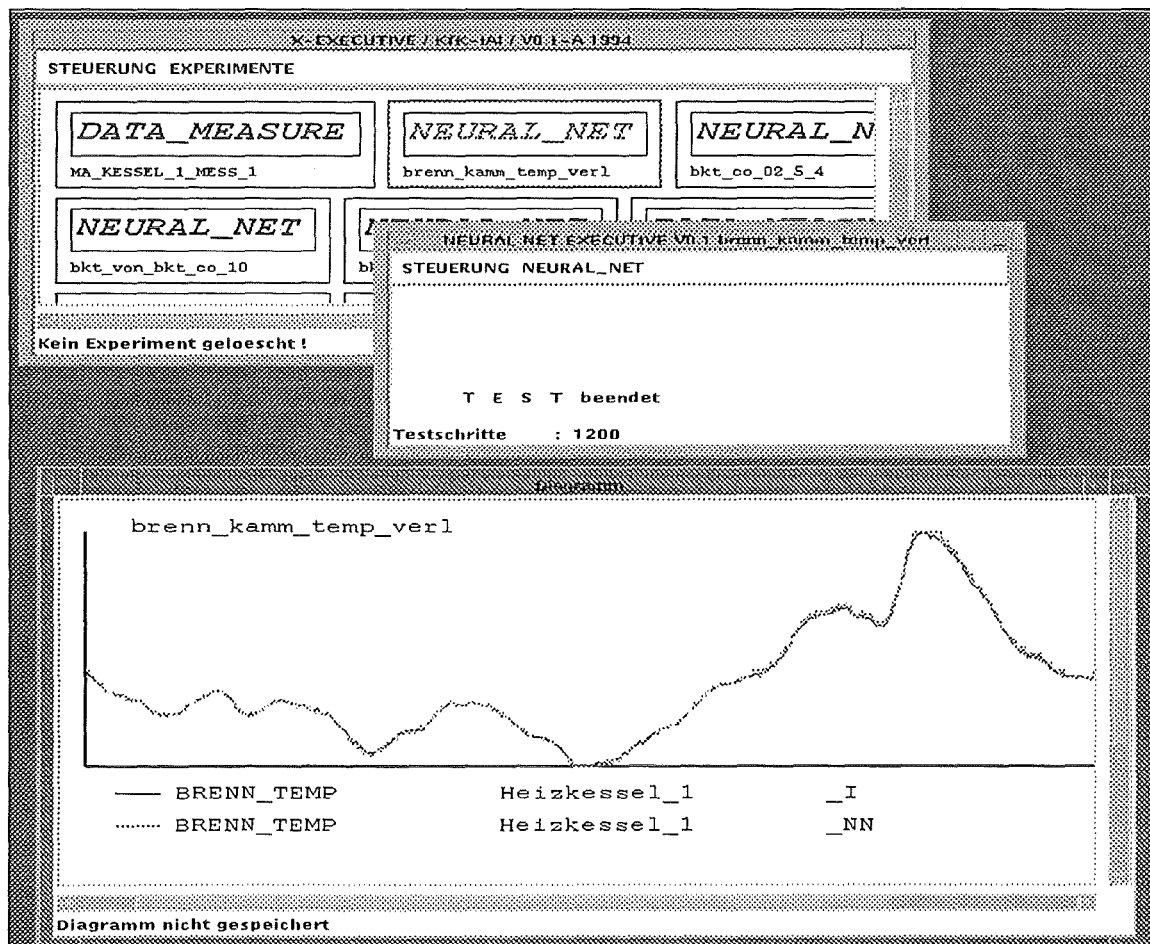


Abb. 7: Die graphische Benutzeroberfläche des X-Executive-Systems

3 Anwendungen neuronaler Netze im Umweltbereich

Wie eingangs erwähnt, erfordern umwelttechnische Belange Modellbeschreibungen über den Aufbau und das Verhalten komplexer natürlicher oder umweltrelevanter technischer Systeme. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Modellbildung solcher Systeme, bietet sich der Einsatz lernender Verfahren hier an.

3.1 Prinzipielle Anwendungsbereiche

Neuronale Netze können für die folgenden funktionalen Aspekte eingesetzt werden:

- Funktionsnachbildung / Assoziation (pattern/auto association),
- Musterklassifikation (classification, regularity finding) und
- Muster-Vervollständigung/-Erkennung (pattern completion - auto/hetero association).

Im Bereich der Umwelttechnik kann es sich z. B. um

- Klassifikation von Spektralanalysedaten (z. B. Radikalennachweis),
- Verarbeitung verrauschter Daten (z. B. Stoffkonzentrationen mit Transportvorgängen),
- Komprimierung umfangreicher Daten (z. B. Klimaforschung),
- Verhaltensprognose (z. B. Ökosysteme),
- Überwachung/Diagnose komplexer Prozesse (z. B. Fehlererkennung in umweltkritischen technischen Bereichen, z. B. chemischer Anlagen),
- Verbesserung der Regelung/Steuerung komplexer technischer Prozesse (z. B. Müllverbrennung, Zellstoffherstellung)

handeln.

Neuronale Netze können als Unterstützung für andere Verfahren (z. B. Adaption von Fuzzy Regeln) oder direkt eingesetzt werden. Im folgenden werden Beispiele für beide Einsatzarten dargestellt. Bei industriellen Großanlagen können neuronale Netze zur Optimierung des Rohstoff- und Energieverbrauches, aber auch zur Erhöhung der Ausbeute bzw. Produktqualität benutzt werden. Bei Ökosystemen kann deren Verhalten simuliert bzw. prognostiziert oder kritische Situationen erkannt werden. Für eine Prognose der zukünftigen Entwicklung eines Ökosystems gibt man z. B. die Schad- und Nährstoffkonzentrationen, die aktuelle Populationsgröße als Eingangswerte und die nächstfolgende Populationsgröße als Ausgabewert aus vergangenen Meßkampagnen vor. Das trainierte Netz berechnet dann aus aktuellen Daten die zukünftige Entwicklung einer Population. Die Ergänzung von Fuzzy Controller durch neuronale Netze kann am Beispiel der Steuerung eines Ballons bei Klimaexperimenten überzeugend gezeigt werden. Im MIPAS-B2-Experiment /1/ soll in der Stratosphäre nach Spurengasen gesucht werden. Das Interferometer muß dabei einen Punkt am Horizont mit einer maximalen Abweichung von 0.025° anpeilen. Ein konventioneller Regler kann dies in 40 km Höhe bei -40°C nicht gewährleisten. Hierzu wird ein Fuzzy Controller eingesetzt, welcher dynamisch über ein neuronales Netz parametrisiert wird. Das neuronale Netz als Prozeßmodell si-

chert dabei permanent die Adaption anhand der Daten aus der sich ändernden Umgebung.

3.2 Diagnose in verfahrenstechnischen Prozessen

Beispielhaft für die Diagnose in chemischen Anlagen wurde in /20/ ein chemischer Reaktor mit Katalysator, Rohrleitungen und Heizung betrachtet. Die möglichen Fehler waren Verschmutzung des Wärmetauschers, chemische/physikalische Veränderungen des Katalysators, Verstopfen der Rohrleitungen und die Abnahme der Heizleistung.

Die Diagnose wurde zweistufig mit neuronalen Netzen durchgeführt. In der ersten Stufe wurde ermittelt welcher Fehler vorliegt und danach wurde in der 2. Stufe der Grad der Fehlersituation bewertet. Es handelte sich um 5 Fehler mit 5 Abstufungen als Maß der Veränderung. Fehler wurden zu 100% erkannt, die Einteilung in die Stufen schwankte von 55% bis 99% Trefferrate.

Die Leistungen neuronaler Netze für Klassifikationsaufgaben wurden in /2/ mit anderen Verfahren verglichen. Neuronale Netze bieten gegenüber Fuzzy Logik, statistischen oder geometrischen Verfahren den Vorteil daß ihre Erkennungsrate sehr hoch und gleichzeitig der Anlern- bzw. Nachlernaufwand gering ist. Die kritisierte geringe Transparenz der Entscheidung kann durch entsprechend lokale Repräsentation behoben werden, dies geschieht allerdings auf Kosten von Fehlertoleranz und interner Speicherkapazität des Netzes.

3.3 Optimierung einer Zellstoffherstellung

Die Optimierung in einer Zellstoffherstellung /6/ umfaßt die Größen Produktqualität, Energie- und Holzverbrauch. Durch den Einsatz eines Fuzzy Controllers ergaben sich schon deutliche Verbesserungen. Da aber die Zellstoffqualität vom Kochvorgang und hier vor allem von der Kochzeit abhängt und erst nach dem Kochvorgang bestimmt werden kann, muß die Kochdauer vorherbestimmt werden. Das bisher hierzu eingesetzte analytische Modell konnte die Abhängigkeiten nur schlecht wiedergeben. Als neuer Ansatz wurde nun ein neuronales Netz mit 3 Schichten, 10 Input-, 10 Hidden- und 1 Output-Neuron(en) eingesetzt. Verarbeitete Informationsgrößen waren Holzqualität, Druck-/Zeitverläufe, Chemikalienkonzentrationen, Heizzeit sowie Permanganatzahl; die zu prognostizierende Kochzeit wurde als Ausgangsgröße verwendet. Das Ergebnis war, daß die neuronale Netz-gestützte Regelung eine um bis zu 30% höhere Ausbeute (Produktqualität) liefert.

3.4 Verbesserung von Kläranlagen-Prozessen

In /10/ wird beschrieben, wie durch den Einsatz eines Fuzzy Controllers die Phosphat-ausfällung in einer Kläranlage erheblich verbessert werden konnte. Allerdings wurde deutlich angemerkt, daß eine weitergehende Optimierung oder eine Portierbarkeit auf

andere Anlagen mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Hierzu werden von neuronalen Netzen eine deutliche Aufwandsverringerung erwartet.

3.5 Auswertung von Spektraldaten

Neuronale Netze werden seit einiger Zeit in der Spektralanalyse eingesetzt /13/. Die Anwendungen reichen dabei von der Aufklärung von Molekülstrukturen, Stoffidentifizierung, Geräuschanalyse bis zur Lebensmittelanalytik. In /4/ werden neuronale Netze eingesetzt, um das Vorhandensein bestimmter Stoffe (organische Gase und Lösungsmittel) und deren Konzentration nachzuweisen. Das eingesetzte Netzmodell ist ein Kohonen-Netz (self-organizing feature map). Gerade auch im Hinblick auf die Entwicklung von chemischen Sensoren auf Basis der Mikro-Systemtechnik (siehe /11/), ist ein hohes Einsatzpotential neuronaler Netze zu erwarten. Die Fähigkeit Informationen mehrerer, evtl. unterschiedlicher Sensoren parallel auszuwerten und die Möglichkeit neuronale Netze in Hardware zu realisieren (siehe Kap. 2.6.3), stellt ein wichtiges Argument für ihren Einsatz dar. Die "elektronische Nase" ist ein erstes System dieser Art /11/.

3.6 Sortieren von PET-Flaschen

Im Bereich der Abfallverwertung existieren verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, einige sind schon als kommerzielle Produkte im praktischen industriellen Einsatz. Ein Beispiel aus dem Bereich der Objektidentifikation, ist das Sortieren von PET-Flaschen mit Hilfe einer neuronalen Bildverarbeitung (/5/). Die unsortiert angelieferten Flaschen werden nach ihrer Form optisch sortiert. Hierzu werden die ankommenden Flaschen zur Aufnahme vereinzelt, durchlaufen eine Lichtschranke und lösen damit ein Signal aus, mit dem das Bild der Flasche zu einem definierten Zeitpunkt aufgenommen werden kann.

Aufgrund der optimierten Aufnahmeverhältnisse sind keinerlei Vorverarbeitungsschritte nötig, Grauwerte werden direkt in ein für diese Aufgabenstellung problemspezifisch entwickelte neuronale Netz zur Klassifikation eingegeben. Es handelt sich dabei um eine modifizierte, mehrlagige Schichtstruktur. Die Neuronen sind ähnlich den Perzeptron-Units. Für das Einlernen wurde ein spezieller Lernalgorithmus entwickelt. Nach einer kurzen Trainingsphase (es werden etwa vier Minuten für 20 Objekte aus einer Lernbibliothek benötigt) ist das System einsatzbereit. Die Bildinformation einer CCD-Kamera wird aus dem Videosignal in 256 Graustufen digitalisiert und in Form einer Matrix von 128 x 128 Bildpunkten gespeichert. Die Synchronisation mit dem Prozeß erfolgt über digitale Ein- und Ausgabesignale zur Triggerung der Bildaufnahme und zur Ansteuerung von Bandweichen.

Die Sortierleistung beträgt 8 Flaschen pro Sekunde, es können bis zu sechs verschiedene Flaschentypen unterschieden werden.

3.7 Prozeßführung von Müllverbrennungsanlagen

Im Bereich der Abfallverarbeitung stellt die thermische Abfallbehandlung einen wesentlichen Prozeßschritt dar, sei es zur Kompaktierung der Reststoffe vor einer Depositionierung oder als Vorverarbeitungsphase für eine Recyclierung. Als Optimierungsziele für die Konstruktion und den Betrieb einer Müllverbrennungsanlage ergeben sich dabei aus ökologischer Sicht:

- Minimale Schadstoffemission über den Abgaspfad in die Atmosphäre (zumindest Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte),
- Reduktion der Müllmengen durch optimalen Ausbrand bei inerten und evtl. wiederverwertbaren, festen Ausgangsprodukten.

Die Führung des Müllverbrennungsprozesses wird durch folgende Probleme bedeutend erschwert:

- Das Brenngut ist heterogen bezüglich seiner chemischen Zusammensetzung, der Konsistenz und bei festen Produkten der Geometrie der Stückung;
- Die Zusammensetzung des Brennguts variiert zeitlich u. U. sprunghaft;
- Die Zusammensetzung des Brennguts kann meßtechnisch nicht erfaßt werden.

Eine Problemstellung, welche durch den Einsatz neuronaler Netze gelöst werden können ist beispielsweise (vgl. /8/) die Simulation des Prozesses zum Training von Anlagenfahrern, als Basis für die Reglersynthese, oder zur Prognose (direkt oder indirekt) von Prozeßzuständen. Zur Prognose von Prozeßzuständen wurde ein Kohonen-Netz verwendet. Der zu lernende Ausgangswert ist eine Temperaturmeßgröße im Verbrennungsbereich. Das neuronale Netz erhält die zeitlichen Verläufe dieser Größen als Eingangsinformation und soll diesen den Ausgangswert zuweisen. Aus den 37 Meßgrößen (Trajektorien) ergaben sich insgesamt 253 Netzeingangsgößen. Die Prognosezeit betrug 6 min bei guter Überwinstimmung.

Im Rahmen von Untersuchungen mehrerer industrieller Anlagen (EU-Projekt) wurde ein NN-basiertes Simulationsmodell der Verbrennung mit einem Multi-Layer-Perzeptron-Netz entwickelt, welches eine gute Übereinstimmung in allen 28 Prozeßparametern zeigte (siehe /15/). Dieses Modell ist die Grundlage zur Entwicklung eines NN-basierten Reglers. Die Übereinstimmung im gekoppelten Betrieb ist gut, im Freilaufbetrieb divergiert aber die Netzantwort im Vergleich zu den Meßwerten nach einiger Zeit (Dampfmasse, Abb. 8). Dies liegt daran, daß eine wesentliche Eingangsgröße des technischen Prozesses, der Brennwert des Mülls, nicht meßtechnisch verfügbar und in das neuronale Netz eingeben werden kann. Der nächste Schritt wird sein, aus der Differenz der Netzantwort und der Meßwerte eine Funktion für die Brennwertbestimmung neuronal abzuleiten.

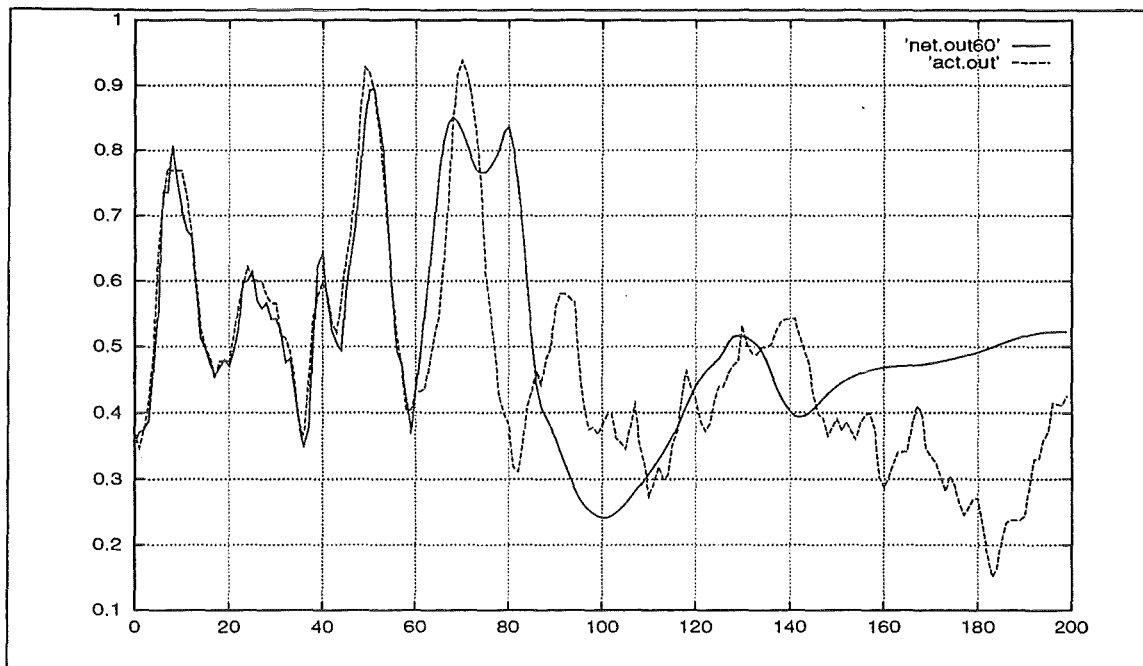


Abb. 8: Simulation des Verbrennungsbereiches in einer Müllverbrennungsanlage (Dampfmasse als Vergleichsausgangsgröße)

4 Zusammenfassung und Ausblick

An dem praktischen Wert neuronaler Netze gibt es keinen Zweifel, sie sind jedoch kein einfach einsetzbares Lösungsparadigma. Ihre **Stärken** sind:

- Gutes Näherungsverhalten, Ausfallsicherheit, Fehlertoleranz,
- Lernfähigkeit auf Musterebene.

Dem stehen folgende **Schwächen** gegenüber:

- Neuronale Netze sind im allgemeinen intolerant gegenüber Wissenserweiterung (inkrementelles Lernen).
- In neuronalen Netzen enthaltenes Wissen ist im allgemeinen nicht explizierbar.
- Neuronale Netze besitzen keine Erklärungsfähigkeit.

Zukünftig wird eine verstärkte Annäherung von symbolischen (Fuzzy Regeln) und sub-symbolischen (neuronale Netze) Verfahren zu erwarten sein. Der Begriff Neuro-Fuzzy beschreibt den Ansatz, neuronale Netze zum Lernen unscharfer Regeln einzusetzen und Fuzzy Regeln als a priori-Wissen auf neuronale Netze zu übertragen. Ein weiterer Bereich ist die Nachbildung von neuronalem Verhalten mit symbolischen Mitteln. Das Ziel ist die Ableitung von Regel-orientierten Modellen dynamischer Systeme /9/.

5 Literatur

- /1/ Eppler, W.: "Adaptive Neuronale Fuzzy-Regelung in einem Ballon-Experiment", Vortrag Arbeitsgruppe Neuronale Netze, 6. Juli 1994, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- /2/ Frank, P. M.: "Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik", at 42 (1994) 2, S. 47-64.
- /3/ Frisch, W.: "Die Architektur - und Werteinstellungsproblematik der Parameter Neuronaler Netze",
in: Frisch, W., Taudes, A.: "Informationswirtschaft", Symposium, Wien, 29./30.9.1993, Physica-Verlag 1994.
- /4/ Göppert, J. et al.: "Evaluation of Spectra in Chemistry and Physics with Kohonen's Self-Organizing Feature Map", in: Neuro Nimes 92, Neural Networks & their Applications, November 2-6, 1992.
- /5/ S. Hafner, et al., Anwendungsstand künstlicher neuronaler Netze in der Automatisierungstechnik, atp 34 (1992) 10, pp. 592-599.
- /6/ Höhfeld, M.: "Innovative Techniken der Informationsverarbeitung für die Umwelt",
Siemens-Zeitschrift Special, FuE Herbst 1993, S. 9-13.
- /7/ Huber, C., et al.: "Entwicklungswerkzeuge für Künstliche Neuronale Netze", atp 35 (1993) 6, S. 368-375.
- /8/ Keller, H. B.: "Prozeßführung in Müllverbrennungsanlagen mit neuronalen Netzen",
Vortrag auf dem 38. Darmstädter Seminar Abfalltechnik,
TH Darmstadt, 24. Februar 1994.
- /9/ Keller, H. B. Weinberger, T.: "Maschinelle Modellierung komplexer dynamischer Systeme - der C3R-Ansatz und Ergebnisse", Vortrag gehalten auf dem 4. Treffen des AK "Werkzeuge für die Simulation und Modellierung in Umwelthanwendungen" der GI-FG 4.6.1, 23.-24.6.1994 Halle
- /10/ K&E: "Phosphat-Elimination durch Fuzzy Logik",
Konstruktion & Elektronik 13, 16.6.1993.
- /11/ KfK (Hrsg.): "Mikrostrukturen in Medizin, Biologie und Analytik",
KfK-Nachrichten, Jahrgang 26, 1/94, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- /12/ Köhle, Monika: "Neuronale Netze",
Springer-Verlag, Wien, 1990.
- /13/ Link, N. et al: "Neuronal-Netz gestützte Spektralanalyse",
in: Ziessow, D. (Ed.): "Software-Entwicklung in Chemie", Proceedings of the 8th Workshop "Computer in Chemistry, Seeheim/Berlin 1993, GDCh, 1993.
- /14/ Michalski, R. et al.: "Machine Learning - An Artificial Intelligence Approach",
Volume I, Springer Heidelberg, 1984.
- /15/ Müller, Bernd; Keller, Hubert B.: "Neural Networks for Combustion Process Modelling", International Conference on Engineering Applications of Neural Networks (EANN 96), London, UK, 17-19 June 1996, accepted paper.

- /16/ Rojas, Raúl: "Theorie der neuronalen Netze - Eine systematische Einführung", Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- /17/ Rückert, U. et al.: "Hardwareimplementierung Neuronaler Netze", atp 35 (1993) 7, S. 414-420.
- /18/ Rumelhart, David E.; McClelland, James L. and the PDP Research Group: "Parallel Distributed Processing", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Volume I & II, 9. Auflage, 1989.
- /19/ Spies, Marcus: "Unsicheres Wissen", Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 1993.
- /20/ Watanabe, K. et al. "Incipient Fault Diagnosis of Chemical Processes via Artificial Neural Networks", AIChE Journal November 1989, Vol. 35, No. 11, S. 1803-1812.
- /21/ Zell, Andreas: "Simulation neuronaler Netze", Bonn: Addison-Wesley, 1994



**6 Einsatz unscharfer Petri-Netze zur Bilanzierung,
Planung und Steuerung von Stoffströmen.**

Siestrup, G.; Tuma, A.; H.-D. Haasis

Einsatz unscharfer Petri-Netze zur Bilanzierung, Planung und Steuerung von Stoffströmen

G. Siestrup, A. Tuma, H.-D. Haasis¹

1 Motivation

In modernen Systemen der industriellen Produktion ist ein Trend zur Bildung von Netzwerken festzustellen. Zur Herstellung von End- bzw. Zwischenprodukten werden Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Energiearten in verteilten Produktionssystemen bereitgestellt, transformiert, gelagert und transportiert. Bei diesen Prozessen der Leistungsbereitstellung, -erstellung und -verwertung werden Kuppelprodukte in flüssigen, gasförmigen und festen Aggregatzuständen emittiert. Dadurch ergeben sich umweltbelastende Auswirkungen im gesamten vernetzten Stoff- und Energieflußsystem. Demgegenüber steht eine politische und gesetzliche Rahmensetzung, deren Prinzip darin besteht, auf den Grundlagen ordnungsrechtlicher Instrumente (Gesetze, Auflagen mit entsprechenden Ge- und Verboten) einzelfallbezogen Maßnahmen durchzusetzen, die auf eine Vermeidung bzw. Verminderung spezieller Emissionen abzielen.

Das Ziel einer Vermeidung der Umweltbelastung (effiziente Ausnutzung von Ressourcen, Reduzierung der Emissionen) kann durch den Einsatz moderner Regelungssysteme erreicht werden [1]. Dies betrifft sowohl die Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieströmen innerhalb einer Produktionsstufe als auch zwischen verteilten Produktionsstufen. Für ein solches Vorgehen werden auch die Begriffe produktions- und prozeßintegrierter Umweltschutz verwandt. Die Ausschöpfung des Minderungspotentials durch derartige Maßnahmen kann mit deutlich geringeren Kosten verbunden sein als „end of pipe“-Technologien.

Produktions- und prozeßintegrierte Ansätze entsprechen dem Rat der Sachverständigen für Umweltfragen im Sondergutachten „Abfallwirtschaft“ und der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, die darauf hinweisen, daß eine umweltorientierte Marktwirtschaft ein globales Umdenken weg von der Durchlaufwirtschaft hin zur Kreislaufwirtschaft erfordert.

¹ Dipl.-Kfm. G. Siestrup, Dr. A. Tuma, Prof. Dr. H.-D. Haasis, Universität Bremen, FB 7, Fachgebiet Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft, Postfach 33 04 40, D-28334 Bremen.

Ziele hierbei sind u.a. [2]:

- Minimierung der Entnahme von Ressourcen bzw. Einsatzstoffen aus der Umwelt,
- Minimierung des Eintrages von Emissionen als nicht verwertbare Anteile der Reststoffe in die Umwelt,
- Erhöhung der Effektivität der Ressourcen- und Einsatzstoffnutzung,
- Verbesserung der Verwertbarkeit von Reststoffen.

Zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft ist in einem ersten Schritt eine Bilanzierung, das heißt eine strukturelle und mengenmäßige Erfassung und Abbildung aller relevanten Stoff- und Energieflüsse (dies entspricht der Sachbilanz einer Ökobilanz) des zu untersuchenden Produktionssystems, vorzunehmen. Darauf aufbauend sind in einem zweiten Schritt Steuer- und Regelungsmechanismen als Bestandteile eines Stoffstrommanagementsystems zu entwickeln, die es erlauben, Stoff- und Energieströme sowohl kurz- als auch langfristig so zu planen und zu steuern, daß unter Berücksichtigung von Rahmenparametern vor- und nachgeschalteter Produktionsstufen zur Verfügung stehende Ressourcen möglichst effizient genutzt und durch den Produktionsprozeß entstehende Emissionen und Reststoffe, soweit dies technisch möglich ist, vermindert werden.

2 Anforderungen an ein Stoffstrombilanzierungs- und -managementsystem für vernetzte Produktionssysteme

Bei der Konzeption eines Planungs- und Steuerungsinstruments für Stoff- und Energieströme in vernetzten Produktionssystemen sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- adäquate Abbildung der Produktionsstruktur:
 - ◆ Kapazitäten und Produktionsraten der einzelnen verteilten Produktionssysteme,
 - ◆ Abbildung von Lager- bzw. Puffersystemen unter Beachtung ihrer Kapazitätsrestriktionen,
 - ◆ Möglichkeit zur Modellierung von analytischen und synthetischen Produktionsstrukturen,
- adäquate Abbildung aller Stoff- und Energieflüsse (diskrete und kontinuierliche Flüsse),
- Möglichkeit zur Aggregation und Disaggregation spezifischer Komponenten des Produktionssystems,

- problemadäquate Bilanzierungsmöglichkeit relevanter Stoff- und Energieflüsse.

Insbesondere Simulationsmodelle auf der Basis von Petri-Netzen erscheinen geeignet dieses Anforderungsprofil zu erfüllen. Petri-Netze sind vielfältig einsetzbar und eignen sich unter anderem für die Modellierung von Geschäftsvorgängen, betrieblichen Organisationsstrukturen, Computer-Kommunikations- sowie Betriebssystemen [3]. Im produktionswirtschaftlichen Kontext werden Petri-Netze insbesondere zur Materialflußanalyse eingesetzt [4]. Ein neueres Einsatzfeld stellt die Anwendung der Konzeption auf umweltschutzorientierte Problemstellungen dar [5]. Petri-Netze bestehen aus stationären Objekten, den Stellen $p \in P$ (die über eine Kapazität C verfügen), und den Transitionen $t \in T$, die über gerichtete Kanten miteinander verbunden sind. Transaktionen, z.B. Stoff- und Energieflüsse, werden mit Marken (M) abgebildet, die in der Simulation das System durchlaufen. Formal kann ein Stellen/Transitionen-System (im weiteren als P/T-System bezeichnet) in Anlehnung an [3] etwa wie folgt definiert werden:

$N = (P, T, F)$ mit

$$P \cap T = \emptyset \text{ und} \\ F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P) \quad (\text{Flußrelation})$$

ist ein Netz. Durch Einführung der Kapazitäten C in den Stellen P , den bewerteten Flußrelationen W (Kantenbewertungen) sowie einer Anfangsmarkierung M_0 kann die Netzdefinition zu einem Stellen-Transitions-Netz Y erweitert werden:

$Y = (P, T, F, C, W, M_0)$ mit:

$$\begin{aligned} N = (P, T, F) & \quad (N \text{ ist ein Netz}), \\ C : P \rightarrow \mathbb{IN} \cup \{\infty\} & \quad (\text{Kapazitäten der Stellen}), \\ W : F \rightarrow \mathbb{IN} & \quad (\text{Gewichte der Kanten}), \\ M_0 : P \rightarrow \mathbb{IN}_0 & \quad (\text{Anfangsmarkierung wobei } \forall p \in P : M_0^p \leq C^p) \end{aligned}$$

Neben der statischen Netzdefinition ist das Schalten (d.h. der Übergang zum Zustand der Folgeperiode) im P/T-System zu präzisieren. Prinzipiell können Petri-Netze nur schalten, wenn die entsprechenden Transitionen aktiviert sind. Eine Transition $t \in T$ heißt aktiviert, wenn für alle Stellen p , die Element des Vorbereichs bzw. des Nachbereichs einer betrachteten Transition sind ($\bullet t$ bzw. $t \bullet$), gilt:

$$\begin{aligned} \forall p \in \bullet t : M^p & \geq W^{p,t}, \\ \forall p \in t \bullet : M^p & \leq C^p - W^{t,p}. \end{aligned}$$

M' heißt Folgemarkierung von M . Die bei dem Übergang (d.h. dem Schalten) der Transition zu beachtende Schaltregel kann dabei etwa wie folgt formalisiert werden:

$$M^{t,p} = \begin{cases} M^p - W^{p,t}, & \text{falls } p \in \bullet t \setminus t \bullet, \\ M^p + W^{t,p}, & \text{falls } p \in t \bullet \setminus \bullet t, \\ M^p - W^{p,t} + W^{t,p}, & \text{falls } p \in t \bullet \cap \bullet t, \\ M^p & \text{sonst.} \end{cases}$$

Weitere Anforderungen, die aufgrund der Steuerungs- und Regelungsaufgaben an ein Stoffstrommanagementsystem zu stellen sind, betreffen etwa die

- Implementierung unscharfen und lokalen Expertenwissens für das gesamte Stoff- und Energieflußsystem,
- Modellierbarkeit alternativer Steuerungspolitiken und deren Bewertung,
- Modellierung dezentraler Steuerungs- und Regelungsstrategien,
- Berücksichtigung unscharfer Kosteninformationen.

Dem formulierten Anforderungskatalog entsprechend, wird im folgenden das Konzept eines Stoffstrommanagement- und -bilanzierungssystems auf der Basis eines Fuzzy-Petri-Netzes zur Lösung der beschriebenen Problemstellung herangezogen.

3 Modellierung eines exemplarischen Produktionssystems als Petri-Netz

Für eine Beurteilung der Eignung von Ansätzen zur Steuerung und Regelung von Stoff- und Energieflüssen ist eine Analyse und Validierung an einem realen Produktionssystem notwendig. Hierzu wird ein Beispiel aus der Textilindustrie herangezogen [6,7]. Ein weiteres Beispiel aus der Prozeßindustrie ist in [8] zu finden. Die Gründe für die Auswahl dieses Produktionssystems sind u.a.:

- die vernetzte Struktur des Produktionssystems,
- die Verfügbarkeit von Produktionsdaten,
- und die Emissionsbelastung durch derartige bzw. vergleichbare Produktionssysteme.

Das Produktionssystem besteht aus:

- einer Färberei,
- einem Wasserkraftwerk,
- einem Kesselhaus,
- einer Spinnerei,
- einer Weberei und

- einer Neutralisationsanlage.

Im Mittelpunkt des Produktionsverbundsystems (Abbildung 1) steht eine Färberei. Die Färberei besteht aus zwei Produktionsstufen, dem Färbeprozess und dem Trocknungsvorgang für gefärbte Garne. In der Färberei werden zur Produktion u. a. Dampf und Strom eingesetzt. Diese Ressourcen werden von zwei vorgelagerten Kraftwerken (Kesselhaus und Wasserkraftwerk) zur Verfügung gestellt. Das im Kesselhaus entstehende Rauchgas enthält in erster Linie CO_2 und SO_2 . In einer nachgeschalteten Abwasseraufbereitungsanlage werden die im Rauchgas enthaltenen Bestandteile CO_2 und SO_2 zur Neutralisation der alkalischen Ab-

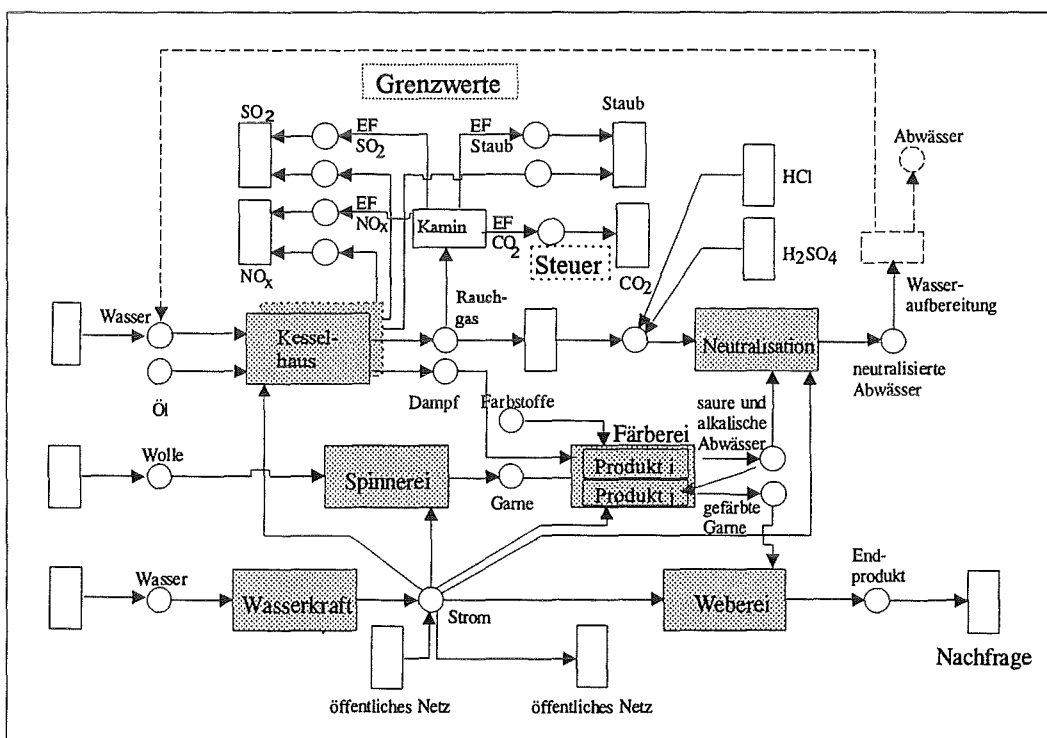


Abbildung 1: Beispiel eines vernetzten Produktionssystems aus der Textilindustrie dargestellt als Petri-Netz

wässer, die aus der Färberei stammen, verwendet. Besteht in der Neutralisation kein Bedarf nach Rauchgas, so wird dieses über den Kamin abgelassen, wobei die entsprechenden Grenzwerte für NO_x , SO_2 und Staub einzuhalten sind. Die Speichermöglichkeiten von Dampf sowie das Fassungsvermögen des Abwasserbeckens sind begrenzt. Die verfügbaren Kapazitäten der Ver-/Entsorgungseinrichtungen verhalten sich dynamisch und sind u. a. eine Funktion exogener Einflußfaktoren (z. B. der Smoglage oder des Wasserpegels im Zufluß). Die zu färbenden Garne werden von einer der Färberei vorgelagerten Spinnerei geliefert und teilweise in der Weberei weiterverarbeitet. Die Spinnerei

wird wiederum mit Rohstoffen (z.B. Wolle, Viskose) und elektrischer Energie versorgt.

Die einzelnen Komponenten des vernetzten Produktionssystems (Produktionsverbundsystem) sind in Abbildung 1 in einem Petri-Netz dargestellt und können wie folgt interpretiert werden:

- Transitionen (symbolisiert durch Rechtecke) repräsentieren etwa
 - ◆ Produktionssysteme (z.B. Kesselhaus, Wasserkraftwerk, Spinnerei, Färberei, Weberei, Neutralisation),
 - ◆ Quellen von Einsatzströmen (z.B. von Rohstoffen, Wasser und elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz) und
 - ◆ Senken von Emissionsströmen (SO_2 , NO_x , Staub und CO_2):
Über die spezifischen Verhältnisse der Emissionen von SO_2 , NO_x und Staub zum Rauchgasvolumenstrom lassen sich Grenzwerte implementieren. Darüber hinaus kann der CO_2 -Ausstoß als Steuerungsgröße verwandt werden. Dies ist etwa im Zusammenhang mit der Diskussion bezüglich der Einführung einer CO_2 -Steuer interessant.
 - ◆ Senken, die auf Nachfrageaktivitäten zurückzuführen sind (Nachfrage nach Endprodukten sowie elektrische Energie, die vom öffentlichen Netz nachgefragt wird).
- Stellen bzw. Plätze (symbolisiert durch Kreise) stehen für Lager- bzw. Puffersysteme (z.B. für ver-/bearbeitungsbereite Güter, wie etwa Garne; vermarktbar Güter, wie etwa Endprodukte etc.).
- Marken charakterisieren den Zustand des Produktionssystems (z.B. Füllzustand des Abwasserbeckens).
- Kanten (in Abbildung 1 dargestellt durch gerichtete Kanten) verbinden Transitionen und Plätze in einem Petri-Netz und legen so die Flußrichtung fest. Dabei sind zwei Typen zu unterscheiden: gerichtete Input- und Outputkanten.

Petri-Netze können aus produktionstheoretischer Sicht als Netzwerke von Produktionsfunktionen gesehen werden. Eine Transition mit ihren zu- und wegführenden Kanten kann aufgrund konstanter Produktionskoeffizienten als limitationale Produktionsfunktion interpretiert werden. Demgegenüber stehen Input- und Outputfaktoren für eine Stelle nicht zwingend in einem festen Verhältnis, so daß Stellen substitutionale Einsatzverhältnisse nachbilden können.

Auf der Basis dieses Konzeptes ist eine Bilanzierung aller relevanten Stoff- und Energieflüsse möglich. Durch die Variation der einzelnen Parameter können unterschiedliche Alternativen im Rahmen der Bilanzierung verglichen werden.

Damit können die Konsequenzen, die etwa durch folgende Parametervariationen ausgelöst werden, bewertet werden:

- Variation der Anzahl und Anordnung von Prozessen, Teilprozessen und Aktivitäten;
- Veränderung der Produktionskoeffizienten;
- Variation der Produktionsstruktur (Verkettung von Prozessen und Puffersystemen);
- Veränderung der Anordnung und Größe von Puffersystemen.

Dezidierte Steuerungs- und Regelungspolitiken können jedoch nicht modelliert werden. Soll das beschriebene Produktionsverbundsystem auf dynamische Anpassungsprozesse (z.B. durch Drosselung der Produktion in der Färberei aufgrund ausgelasteter Kapazitäten in der Neutralisation) innerhalb der Ablaufstruktur hin untersucht werden, so bietet sich die Anwendung der Simulation auf der Basis eines fuzzyfizierten Petri-Netzes an.

4 Stoffstrommanagement mittels unscharfer Petri-Netze*

Zur Integration des unscharfen Steuer- und Regelungswissens, kann das oben dargestellte Petri-Netz um Membershipfunktionen bzw. Zugehörigkeitsfunktionen ergänzt werden. Ein derartig fuzzyfiziertes Petri-Netz kann aus einem Stellen/Transitionen-Netz abgeleitet werden, indem etwa die Kapazitäten der Stellen bzw. die Bewertung der Kanten als unscharfe Mengen modelliert werden. Die Zugehörigkeitsfunktionen werden hierbei auf der Basis von Erfahrungswissen gebildet [9,10]. Entsprechend kann ein Fuzzy-Petri-Netz als Menge spezieller Stellen/Transitionen- bzw. Petri-Netze interpretiert werden. Aus modellierungstechnischen Gründen werden die Kanten nicht direkt fuzzyfiziert. Im Gegensatz zu Stellen/Transitionen-Netzen wird für die Transitionen eine Stellgröße v definiert, die etwa als Kapazitätsgröße einer Transition aufgefaßt werden kann. Die Stellgröße v , die im folgenden als unscharfe Menge \tilde{V}^t definiert wird, geht als Multiplikator in die Kantenbewertung ein. Klassischen Petri-Netzen entsprechend, wird auch in der hier vorgestellten modifizierten Netzvariante eine diskrete Markenanzahl geschaltet. Demgemäß kann ein Fuzzy-Petri-Netz \tilde{Y} etwa definiert werden als:

* Im Fachgebiet Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft der Universität Bremen wird derzeit in Kooperation mit der MIT GmbH (Aachen) die Anwendung des Fuzzy-Petri-Netz-Tools PENSUM auf produktionswirtschaftliche Problemstellungen untersucht.

$\tilde{Y} = (P, T, F, \tilde{C}^P, \tilde{V}^t, W, M_0)$ mit:

(P, T, F) ist ein Netz,

$\tilde{C}^P : P \rightarrow [0, 1]$

(Membershipwert der Stelle p),

$\tilde{C}^P = \left\{ \left(m, \mu_{\tilde{C}^P}(m) \right) \mid m \in M \right\}$

(Membershipfunktion der Stelle p),

$\tilde{V}^t : T \rightarrow [0, 1]$

(Membershipwert der Transition t),

$\tilde{V}^t = \left\{ \left(v, \mu_{\tilde{V}^t}(v) \right) \mid v \in V \right\}$

(Membershipfunktion der Transition t),

$W : F \rightarrow \mathbb{IN}$

(Gewichte der Kanten),

$M_0 : P \rightarrow \mathbb{IN}_0$

(Anfangsmarkierung).

Im Vergleich zu Stellen/Transitionen-Netzen, bei denen die Aktivierungszustände der Transitionen binäre Werte annehmen können, werden diese bei unscharfen Petri-Netzen mit (kontinuierlichen) Zufriedenheitswerten (Zugehörigkeitswerten) bewertet. Ausgangspunkt dieser Bewertung ist die Markierung M' , die sich durch einmaliges Schalten aus M ergibt. Die bei dem Übergang zu beachtende Schaltregel kann dabei formalisiert werden über:

$$M'^p = \begin{cases} M^p - W^{p,t} \cdot v^*, & \text{falls } p \in \bullet t \setminus t \bullet, \\ M^p + W^{t,p} \cdot v^*, & \text{falls } p \in t \bullet \setminus \bullet t, \\ M^p - W^{p,t} \cdot v_t^* + W^{t,p} \cdot v_t^*, & \text{falls } p \in t \bullet \cap \bullet t, \\ M^p & \text{sonst.} \end{cases}$$

v^* wird hierbei so bestimmt, daß die Zufriedenheitswerte der Aktivierungszustände der betroffenen Stellen und der Zugehörigkeitswert für die Stellgröße der betrachteten Transition möglichst hoch sind.

Die einzelnen Elemente des Produktionsverbundes werden dabei zunächst wie folgt bewertet:

- *Bewertung des Durchflusses von Transitionen mit Zufriedenheitswerten:* den potentiellen Kapazitätsquerschnitten der einzelnen betrieblichen Einheiten werden Zufriedenheitswerte zugeordnet (Abbildung 2a). Der Durchfluß der Transitionen kann dabei, ähnlich wie bei einem Ventil, variabel gestaltet werden. Analog gilt dies auch für alle Senken und Quellen, die durch Transitionen modelliert werden.
- *Bewertung der Veränderung des Durchflusses von Transitionen:* der Gradient des Kapazitätsquerschnitts wird mit einem Zufriedenheitswert bewertet. Durch die Begrenzung der Dynamik (Abbildung 2b) wird der Tatsache Rechnung getragen, daß reale Prozesse (z.B. in der Färberei) vielfach nicht in der Lage sind, unendlich schnell auf Bedarfsänderungen reagieren zu können.

- *Bewertung des Füllzustandes von Stellen mit Zufriedenheitswerten:* die Kapazitäten der einzelnen Lager- bzw. Puffersysteme werden mit Zufriedenheitswerten bewertet (Abbildung 2c).

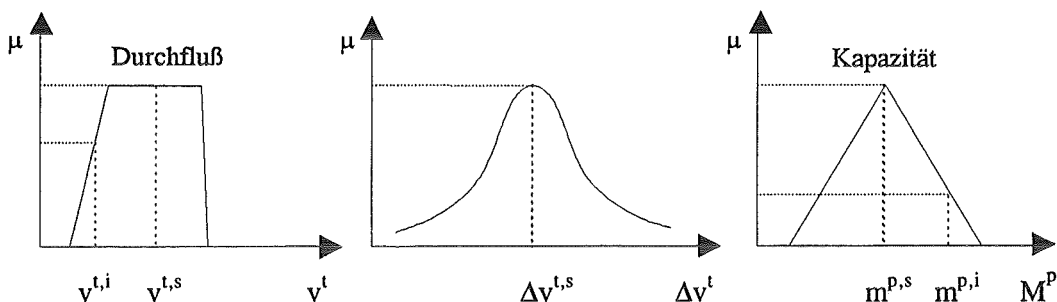


Abb. 2a: Bewertung einer Transition (statische)

Abb. 2b: Dynamikbewertung einer Transition

Abb. 2c: Bewertung einer Stelle (statisch)

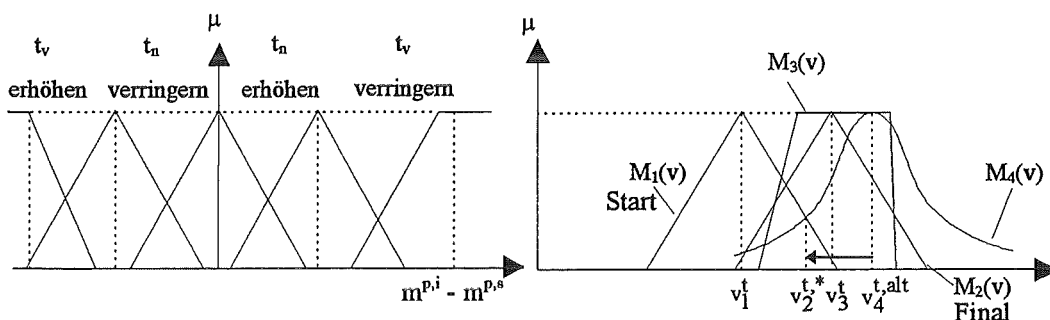


Abb. 2d: Auswahl der Transition und deren Reaktionsweise

Abb. 2e: Ermittlung von M_{agg} und v^*

Die Stelle mit dem geringsten Zugehörigkeitswert löst im Netz eine Triebkraft aus, die einen Markenfluß bewirken soll. Die angeschlossenen Elemente können auf die angestrebte Veränderung treibend oder hemmend wirken. Im einzelnen besteht der dynamische Anpassungsprozeß aus vier Phasen:

- Zunächst wird diejenige Stelle mit dem niedrigsten Zufriedenheitswert im Netz bestimmt.
- In einem zweiten Schritt wird die Transition ermittelt, die nach der Erfahrung der Experten am ehesten geeignet erscheint, den Zufriedenheitswert der ausgewählten Stelle unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf andere Systemelemente zu erhöhen. Hierzu wird in Abhängigkeit vom momentanen Zufriedenheitswert diejenige Transition ausgewählt, deren Membershipfunktionswert in bezug auf die angestrebte Veränderung des Systemverhaltens am höchsten ist. Hierbei werden die von einer Durchflußerhöhung bzw. -ver-

ringerung vor- bzw. nachgelagerter Transitionen (t_v und t_n) ausgehenden Konsequenzen ermittelt (Abbildung 2d).

- Zur Ermittlung des neuen Stellwertes der Transition (neuer Kapazitätsquerschnitt) werden folgende Membershipfunktionen in Abhängigkeit von der Stellgröße herangezogen bzw. konstruiert:
 - ◆ Funktion $M_1(v)$, die die Zufriedenheit bezüglich des veränderten Zustands in der auslösenden Stelle darstellt.
 - ◆ Funktion $M_2(v)$, die die Zufriedenheit bezüglich der restlichen Stellen repräsentiert.
 - ◆ Membershipfunktion der Transition $M_3(v)$ und die Dynamikbewertung $M_4(v)$.

Aus diesen Funktionen wird eine aggregierte Funktion gebildet (Abbildung 2e). Der neue Stellwert ergibt sich aus der Maximierung der Funktion M_{agg} :

$$\max M_{agg} = \max \min\{M_1(v), M_2(v), M_3(v), M_4(v)\}.$$

Die Triebkraft im treibenden Element wird durch die gefundene Kompromißlösung abgebaut. Damit wird ein Kräftegleichgewicht angestrebt.

5 Zusammenfassung

Petri-Netze können für die Stoffstrombilanzierung, Fuzzy-Petri-Netze darüber hinaus auch als Werkzeuge für ein operatives Stoffstrommanagement in komplexen Produktionsverbundsystemen, eingesetzt werden. Der Einsatz von Simulationsmodellen auf der Basis von Fuzzy-Petri-Netzen erlaubt es, Stoff- und Energieströme so zu steuern, daß unter Berücksichtigung von Rahmenparametern vor- und nachgeschalteter Produktionseinheiten zur Verfügung stehende Ressourcen effizienter genutzt und durch den Produktionsprozeß entstehende Emissionen und Reststoffe vermindert werden. Durch die Berücksichtigung von Erfahrungswissen unterstützt das Fuzzy-Petri-Netz-Konzept damit den operativen Entscheidungsprozeß.

Interessante Einsatzgebiete verspricht neben der Steuerung und Kontrolle komplexer Produktionssysteme auch der Einsatz des Fuzzy-Petri-Netz-Konzepts im Rahmen der strategischen Planung von Produktions- und Redistributionsnetzwerken.

Literatur:

- [1] Haasis, H.-D.: Betriebliche Umweltökonomie, Springer, Berlin u.a. 1996, S.170 ff.
- [2] Wicke, L.; Haasis, H.-D.; Schafhausen, F.; Schulz, W.: Betriebliche Umweltökonomie, Vahlen, München 1992, S.175 ff.
- [3] Baumgarten, B.: Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen, BI-Wiss.-Verl., Mannheim 1990, S.15 und S.79 ff.
- [4] Krauth, K.: Modellierung und Simulation flexibler Montagesysteme mit Petri-Netzen, in: OR-Spektrum Nr.12, 1990, S.239-248.
- [5] Schmidt, M.; Giegrich, J.; Hilty, L. M.: Experiences with ecobalances and the development of an interactive software tool, in: Hilty, L. M. u.a. (Hrsg.): Informatik für den Umweltschutz, Metropolis, Marburg 1994, Band 2, S.101-108.
- [6] Tuma, A.: Entwicklung emissionsorientierter Methoden zur Abstimmung von Stoff- und Energieströmen auf der Basis von fuzzyfizierten Expertensystemen, Neuronalen Netzen und Neuro-Fuzzy-Ansätzen, Diss., Lang, Frankfurt a.M., 1994, S.69.
- [7] Tuma, A.; Haasis, H.-D.; Rentz, O.: Maschinelles Lernen und wissensbasierte Ansätze - Konzepte für umweltschutzintegrierte Produktionsleitstände, in: IM Information Management, Nr.2, 1995, S.28-36.
- [8] Minas, H.-J.; Meier, W.: Ein kombiniertes Regelungs- und Simulationssystem für komplexe Produktionsanlagen, Zeitschrift für Chemie-Technik, Oktober 1994.
- [9] Lipp, H.-P.: Ein Konzept eines unscharfen Petri-Netzes als Grundlage für operative Entscheidungsprozesse in komplexen Produktionssystemen, Diss., Chemnitz 1989, S.19 ff.
- [10] Lipp, H.-P.: An application of a Fuzzy Petri Net in complex industrial systems, in: Mathematische Forschung: Fuzzy sets applications, methodological approaches and results, Band 30, Berlin 1986, S.188-196.

**7 Steigerung der betrieblichen Öko Performance
durch die integrierte Unternehmensmodellierung.**

Caduff, G.

Steigerung der betrieblichen Öko Performance durch die integrierte Unternehmensmodellierung

Dipl. Ing. G. Caduff

Betriebswissenschaftliches Institut der ETH Zürich

Zürichbergstr. 18, CH-8028 Zürich, Schweiz

Tel.: +41-1-632 05 60, Fax: +41-1-632 10 45

Email: caduff@bwi.bep.ethz.ch

Zusammenfassung:

Environmental Performance Evaluation (EPE) und Life Cycle Assessment (LCA) sind notwendige Werkzeuge für das Umweltmanagement zur effektiven und effizienten Vermeidung und Verminderung negativer Umweltauswirkungen aus der betrieblichen Tätigkeit. EPE und LCA, wie sie auch in der internationalen Norm ISO 14000ff beschrieben werden, sind eng miteinander verbunden. Die gemeinsame Basis für EPE und LCA kann eine ökologische Produkt- oder Prozessbeschreibung mit Hilfe einer Sachbilanz sein. Durch den Einsatz der Unternehmensmodellierung und weiterführenden mathematischen Methoden kann der Aufwand zur Entwicklung und zum Unterhalt umweltrelevanter Informationen minimiert und die Verwendung vereinfacht werden.

Abstract:

Environmental Performance Evaluation (EPE) and Life Cycle Assessment (LCA) are both useful management tools for the effective and efficient avoidance and reduction of operational effects damaging to the environment. EPE and LCA, as they are termed in the international Standard ISO 14000ff, for example, are linked. The basis for EPE as well as for LCA can be a product and process analysis, for which a common inventory is useful. Implementing the enterprise modelling method and other mathematical methods makes the development and maintenance of an ecological data base less time-consuming and makes it easier to use.

Begriffe:

Life Cycle Assessment, Environmental Performance Evaluation, Unternehmensmodellierung, Neuronale Netze, Umweltkennzahlen, Produkt und Prozessbilanzen.

1. Kein Umweltmanagement ohne EPE und LCA

Führt ein Unternehmen ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 ein, so verpflichtet sich das Unternehmen zur kontinuierlichen Verbesserung der umweltorientierten Leistung¹. Dazu sind u.a. Verfahren einzuführen, mit welchen die

¹ Die umweltorientierte Leistung ist definiert als die messbaren Ergebnisse des Umweltmanagementsystems einer Organisation in Bezug auf die kontrollierten Einwirkungen ihrer Tätigkeiten, Produkte und/oder

Umweltaspekte² beurteilt werden können. Relevante Tätigkeiten, Produkte bzw. Dienstleistungen sind regelmässig zu überwachen und bedeutende Einwirkungen auf die Umwelt sind zu beurteilen. Auf dieser Basis kann die Zielerreichung überprüft und neue Ziele zur kontinuierlichen Verbesserung formuliert werden.

Environmental Performance Evaluation EPE (ISO 14031) und Life Cycle Assessment LCA (ISO 14040-43) sind u.a. geeignete Instrumente zur Erfüllung dieser Anforderungen.

1.1 Environmental Performance Evaluation ISO 14031

Der EPE-Prozess (vgl. Abb. 1) beschreibt den Vorgang des zielgerichteten und den Bedürfnissen des Umweltmanagements entsprechenden Erfassens, Analysierens, Beurteilens, Beschreibens und Kommunizierens der betrieblichen umweltorientierten Leistungen /1/.

Mit Hilfe der Informationen aus dem EPE-Prozess können die relevanten bestehenden und künftigen Umweltaspekte erkannt und mit den Zielvorgaben des Umweltmanagements verglichen werden. Bei Bedarf ist das Management aufgrund der Informationen befähigt, notwendige Korrekturmaßnahmen zur Zielerreichung einzuleiten. Idealerweise können durch den EPE-Prozess sämtliche Produkte bzw. Dienstleistungen, Prozesse und das Unternehmen selbst hinsichtlich ihrer betrieblichen ökologieorientierten Leistungen beschrieben werden.

Oft ist es jedoch nicht möglich, eine geeignete Messgrösse zu finden, mit welcher Informationen hinsichtlich der umweltorientierten Leistung genügend präzise dargestellt werden können. In diesem Fall müssen Kennzahlen und Ersatzmassstäbe (= Indikatoren) bestimmt werden, welche für eine operable Formulierung geeignet sind.

Kennzahlen und Indikatoren (Environmental Performance Indicators EPI's) können für die Bereiche Umweltzustand, das Managementsystem und den betrieblichen Transformationsprozess festgelegt werden. Der betriebliche Transformationsprozess beinhaltet sämtliche physische Teile eines Unternehmens. Der Umweltzustand beschreibt die Umwelteinwirkungen der betrieblichen Tätigkeit auf die Ökosphäre. Dabei besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem Umweltzustand und dem betrieblichen Transformationsprozess. Das Umweltmanagementsystem beinhaltet die Organisationsstrukturen, Verantwortlichkeiten, Praktiken, Verfahren, Prozesse und Mittel zur Umsetzung und Aufrechterhaltung des Umweltmanagements /4/.

Dienstleistungen auf die Umwelt, bezogen auf die Umweltpolitik, die umweltspezifischen Zielsetzungen und Ziele /3/.

² Umweltaspekte sind Bestandteile der Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation, welche in Wechselwirkung mit der Umwelt treten können /3/.

1.2 Life Cycle Assessment ISO 14040-14043

Life Cycle Assessment (LCA) ist ein Instrument zur Beurteilung von Umweltaspekten und möglichen Umwelteinflüssen eines Produktes über sämtliche Lebensphasen hinweg. Die LCA-Studie kann in unterschiedliche Phasen gegliedert werden vgl. Abb. 1.

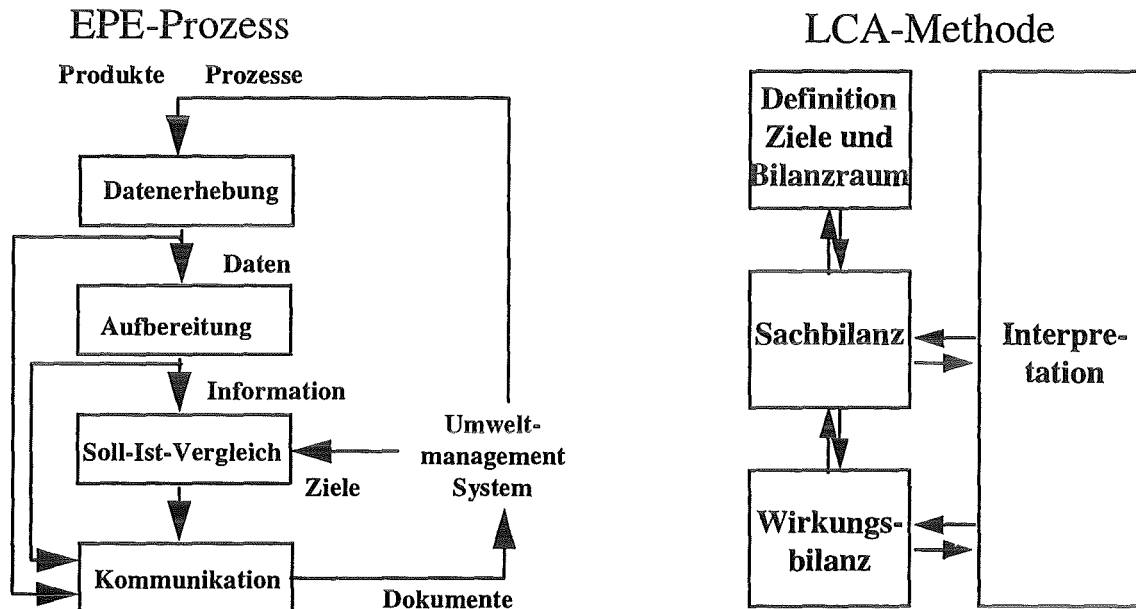


Abb. 1: EPE-Prozess und Life Cycle Assessment Methodik vgl. /1/, /2/.

Von entscheidender Bedeutung innerhalb einer LCA-Studie ist die klare Spezifikation des zu untersuchenden Systems. Ein System besteht dabei aus verschiedenen durch Material-, Energie- und Informationsflüsse verbundenen Prozesseinheiten, und kann somit unterschiedliche Funktionen erfüllen. Die Systemgrenzen werden durch die Prozesseinheiten definiert, welche im zu modellierenden System integriert sind.

1.3 Abgrenzung zwischen EPE und LCA

Umwelteinwirkungen werden nicht nur durch die Environmental Performance Evaluation sondern auch innerhalb des Life Cycle Assessments beschrieben. Die Unterschiede liegen in der Betrachtungsweise. Während sich EPE auf Umweltauswirkungen innerhalb der Entscheidungsbefugnis einer Organisation konzentriert, beschreibt LCA die Umwelteinwirkungen eines Produktes während all seiner Lebensphasen /12/. Für Unternehmen mit einer Vielzahl von Prozessen und Produkten ist es sinnvoll für die EPE und LCA dieselbe Datenstruktur aufzubauen und dieselbe Vorgehensweise zu wählen. Für solche Unternehmen hat sich deshalb auch die Bestimmung der Environmental Performance auf Basis der Sachbilanz als geeignet erwiesen.

1.4 LCA und EPE als Management Tools

Aus den Normenentwürfen der ISO 14000ff lassen sich für diesen Ansatz u.a. folgende sowohl für EPE als auch LCA geltende Anforderungen ableiten:

- Die Organisation führt ein Verfahren ein und erhält diese aufrecht, um die Umweltaspekte ihrer Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen, die sie kontrollieren kann und bei denen eine Einflussnahme möglich erscheint, festzustellen, um daraus jene Gesichtspunkte zu ermitteln, die erhebliche Einwirkungen auf die Umwelt haben oder haben können /4/.
- Die relevante Tätigkeiten, die relevanten Produkte oder die relevanten Dienstleistungen sind zu modellieren. Das Modell ist weit genug zu fassen, um eine aussagekräftige Beurteilung zu ermöglichen und gleichzeitig klein genug, um noch genügend verstanden zu werden /5/.
- Die gewonnenen Informationen sollen für die nachhaltige Verbesserung von Produkten und Prozessen, zur Unterstützung von Umweltpolitik und Umweltzielen und als Grundlage zur Berichterstattung herangezogen werden /1/.
- Die Auswahl der Inputs und Outputs, das Ausmass der Aggregation innerhalb der Datenkategorien und die Modellierung des Systems sollen mit dem Ziel der Studie übereinstimmen. Das System sollte in der Art modelliert werden, dass alle Inputs und Outputs als Elementarflüsse ausgedrückt werden können. Allokationsregeln müssen bei Systemen, die von unterschiedlichen Produkten durchlaufen werden, bestimmt werden. Material- und Energieflüsse sollten zur Generierung von Sachbilanzen den verschiedenen Produkten zugeteilt werden /6/.
- Die Inputgrößen können beispielsweise in Informationen, Materialien, Ressourcen und Energie, die Outputgrößen in Produkte, Abprodukte sowie Emissionen gegliedert werden.

Durch den Einsatz von LCA und EPE als Management-Tools können eine Reihe von Resultaten erreicht werden. Zum Beispiel:

- Ökologische Beurteilung von Produkten, Prozessen und des Unternehmens,
- Bildung von Kennzahlen (Benchmarking),
- Grundlagen zur Steigerung der Öko-Performance³ von Produkten, Dienstleistungen und Prozessen und damit in der Regel auch eine Kostenreduktion,
- erleichterter Zugang zum Kapitalmarkt und Reduktion von Versicherungsprämien durch Abschätzung ökologischer Risiken,
- Wettbewerbsvorteile und Verbesserung des Firmenimages durch interne und externe Kommunikation ökologieorientierter Informationen (z.B. Umweltbericht, Öko-Marketing, Kundeninformationen, usw.).

³ Öko-Performance ist die effektive und effiziente Vermeidung und Verminderung von negativen Umwelteinwirkungen aus der betrieblichen Tätigkeit unter Berücksichtigung ökonomischer Randbedingungen /7/.

2. Die qualifizierte Sachbilanz als Grundlage der ökologischen Beurteilung

Mit besonderen Schwierigkeiten sind Produktionsbetriebe mit unterschiedlichen Produkten und einer Vielfalt von angewandten Prozessen konfrontiert. Obwohl die zur Bildung von Bilanzen notwendigen Informationen oft in Produktdatenbanken, Stücklisten oder Operationsplänen vorhanden sind, fehlen meist konkrete Angaben bezüglich der für Produkte und Prozesse eingesetzten Mengen an Stoffen und Energien. Für viele Stückguthersteller ist die Erfassung von Daten, sowie das Aufbereiten der Daten zu Informationen mit grossem Aufwand verbunden. Aus diesem Grund ist einerseits ein Konzept erforderlich, welches die oben genannten Anforderungen der problemorientierten Datenaufbereitung erfüllt und andererseits ist ein betriebliches Instrument erforderlich, mit welchem dieses Konzept realisiert werden kann.

Die Datenaufbereitung kann beispielsweise mit dem Konzept der qualifizierten Sachbilanz erfolgen. Unter dem Begriff der qualifizierten Sachbilanz ist ein Bilanzierungskonzept zu verstehen, welches Stoff und Energieflüsse einer Vielfalt von Produkten und Prozessen differenziert darstellen lässt und die zielgerichtete Bildung von Informationen unterstützt. Neben den Anforderungen aus den Normen können zusätzliche Anforderungen an ein solches Konzept erhoben werden, wie beispielsweise:

- Aus vorhandenen Informationen sollen weitgehend automatisch zielgerichtete Sachbilanzen generiert werden,
- Energie- und Stoffflüsse müssen nachvollzogen werden können,
- Das Bilanzierungskonzept soll nicht nur einer Bestandsaufnahme dienen, sondern auch zur Planung herangezogen werden können.

Die qualifizierte Sachbilanz baut auf der in Abb. 2 aufgezeigten Struktur auf.

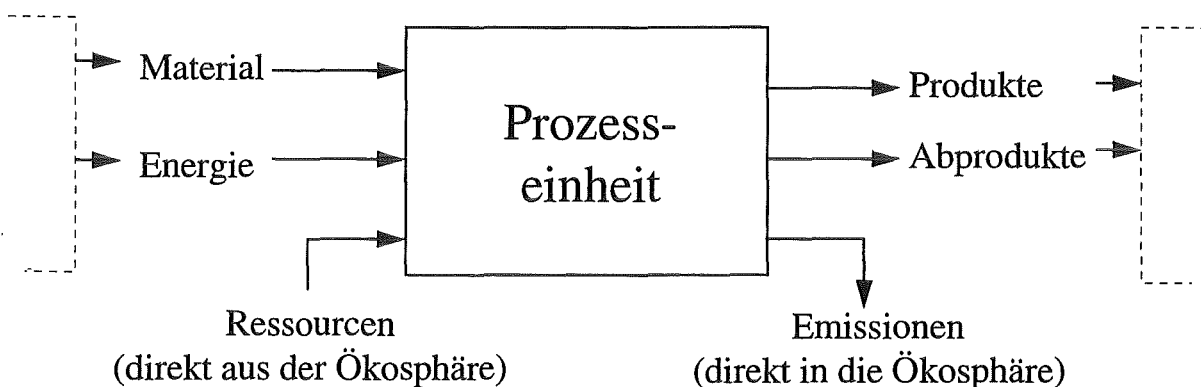


Abb.: 2: Input- und Output-Datenkategorien in Anlehnung an /6/.

Produktsysteme sollten in Prozesseinheiten unterteilt werden, wobei jede Prozesseinheit eine einzelne Operation oder eine Gruppe von Operationen darstellt. Der Input eines Einheitsprozesses wird in Material, Energie und Ressourcen gegliedert. Material und Energie durchlaufen vorgelagerte Prozesseinheit.

Ressourcen werden direkt der Ökosphäre entzogen. Der gewünschte Output eines Einheitsprozesses ist das Produkt. Neben dem Produkt entstehen jedoch weitere, unerwünschte Stoffe, die in Abprodukte und Emissionen gegliedert werden können. Unter dem Begriff der Emissionen werden sämtliche Outputgrößen verstanden, welche direkt der Ökosphäre abgegeben werden. (z. B. Rauchgase, Abwärme etc.). Produkte und Abprodukte durchlaufen nachgelagerte Prozesseinheiten.

Sämtliche Input- und Output-Kategorien können eingehender spezifiziert werden. So bestehen Produkte, Abprodukte und Emissionen wiederum aus Material, Energie und Ressourcen. In Vektorform lassen sich die Inputs I und Outputs O wie folgt beschreiben:

$$I := \begin{bmatrix} [M] \\ [E] \\ [R] \end{bmatrix} \text{ und } O := \begin{bmatrix} [P] \\ [A] \\ [Em] \end{bmatrix} \text{ mit } [P] := \begin{bmatrix} [M] \\ [E] \\ [R] \end{bmatrix}, [A] := \begin{bmatrix} [M] \\ [E] \\ [R] \end{bmatrix} \text{ und } [Em] := \begin{bmatrix} [M] \\ [E] \\ [R] \end{bmatrix}$$

M: Material

E: Energie

R: Ressourcen

P: Produkt

A: Abprodukt

Em Emissionen

Die Prozesseinheit stellt einen Transformationsprozess dar. Mit dieser Nomenklatur lassen sich nun einzelne zielgerichtete Sachbilanzen und Kennzahlen für Prozesse, Produkte oder für einen Betrieb mathematisch erstellen. Voraussetzung hierfür ist eine produktspezifische und prozessspezifische Differenzierung der Inputs und Outputs. Unter produktspezifischen Inputs I_{Pd} und Outputs O_{Pd} werden solche verstanden, die direkt in das Produkt einfließen. Die prozessspezifischen Inputs I_{Pz} bzw. O_{Pz} werden für das Betreiben des Prozesses benötigt. Mit diesem Konzept lassen sich bedarfsgerecht Sachbilanzen für beliebige Produkte Pd_j und Prozesse Pz_i in unterschiedlicher Tiefe bestimmen vgl. /10/ .

Produktbilanz für das Produkt Pd_j

$$\text{Input: } \sum_{i=1}^n I_{Pz_{ij}} + \sum_{j=1}^m I_{Pd_{ij}}$$

$$\text{Output: } \sum_{i=1}^n O_{Pz_{ij}} + \sum_{j=1}^m O_{Pd_{ij}}$$

Prozessbilanz für den Prozess Pz_i

$$\text{Input: } \sum_{j=1}^m I_{Pz_{ij}}$$

$$\text{Output: } \sum_{j=1}^m O_{Pz_{ij}}$$

Betriebsbilanz

$$\text{Input: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (I_{Pz_{ij}} + I_{Pd_{ij}})$$

$$\text{Output: } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (O_{Pz_{ij}} + O_{Pd_{ij}})$$

Um jedoch Stoff- und Energieflüsse verfolgen zu können und die Öko-Performance von Produkten, Prozessen und Unternehmen spezifisch zu bestimmen, müssen

Input- und Outputströme innerhalb der Prozesseinheiten miteinander verknüpft werden. Dies kann beispielsweise durch mathematische Verknüpfungen erfolgen. Diese mathematischen Verknüpfungen können in unterschiedlichen Formen auftreten. Es sind hier beispielhaft zwei mögliche Ansätze gezeigt:

- Lineare Zuschlüsselungsmatrix:

Die Elemente der Zuschlüsselungsmatrix Z beschreiben den Zusammenhang zwischen den Input- und Outputdaten. Das Element Z_{mn} der Matrix Z bestimmt die Mengenaufteilung des Elements I_{m1} des Inputvektors auf die Elemente O_{1n} des Outputvektors. Die Bestimmung der Elemente der Matrix kann einerseits direkt erfolgen, oder aber auch nach Bestimmung der Input- und Outputgrößen errechnet werden. Um den prozessspezifischen Output zu bestimmen ist die Definition eines Bezugsmaßes B erforderlich, welches die Allokation von prozessspezifischen Daten auf das Produkt zulässt. Als Beispiel kann die Oberfläche als Bezugsmaß für einen Beschichtungsvorgang herangezogen werden.

$$\begin{bmatrix} [M] \\ [E] \\ [R] \end{bmatrix}_{I_{Pd}} \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & & \\ & \dots & \\ & & Z_{mn} \end{bmatrix}_{Pd} = \begin{bmatrix} [P] \\ [A] \\ [E] \end{bmatrix}_{O_{Pd}} \quad \text{und} \quad \begin{bmatrix} [M] \\ [E] \\ [R] \end{bmatrix}_{I_{Pz}} \cdot [B] \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & & \\ & \dots & \\ & & Z_{mn} \end{bmatrix}_{Pz} = \begin{bmatrix} [P] \\ [A] \\ [E] \end{bmatrix}_{O_{Pz}}$$

mit B: Bezugsmaß

- Neuronale Netze

Typische Aufgabenstellungen für neuronale Netze sind charakterisiert durch eine für den Menschen unübersichtliche Datenmenge. Neuronale Netze haben den Vorteil, dass durch die Lernfähigkeit des Systems keine Regeln zur Beschreibung notwendig sind, sondern Erfahrungswissen ausreicht /8/. Die Anwendung neuronaler Netze ist daher besonders zur ökologischen Beschreibung komplexer Prozesse geeignet.

Das Konzept der qualifizierten Sachbilanz erfüllt sämtliche Anforderungen und lässt in ausgezeichneter Weise die Bildung von zielgerichteten Kennzahlen zu vgl. Abb. 3.

Die Kennzahlen lassen einerseits die Beurteilung von Produkten und Prozessen zu und können andererseits auch für das Benchmarking verwendet werden.

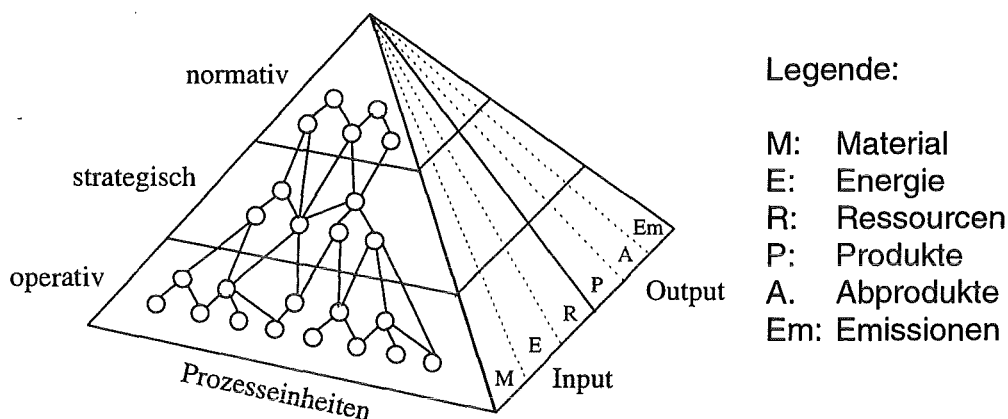


Abb. 3: Kennzahlensystem

Probleme innerhalb dieses Konzeptes bestehen bei den oft unvollständigen Daten. Solche Datenlücken können einerseits durch die geeignete Wahl der Systemgrenze oder durch Schätzungen aufgehoben werden. Fließen unterschiedlich präzise erhobene Daten in den Modellierungsprozess, so ist es sinnvoll, die Daten mit Qualitätsindikatoren zu versehen. Andererseits können Anstrengungen zur zusätzlichen Erhebung von Daten unternommen werden. So verlangt beispielsweise die British Telecommunication bereits heute von ihren Lieferanten Aussagen über die Umweltbelastung der Produktionsprozesse und über die Inhaltsstoffe der Zukaufteile.

3. Die Unternehmensmodellierung als Problemlösung

Es stellt sich nun die Frage, wie sich ein solches Konzept in einer Unternehmung realisieren lässt. Als geeignetes Instrument zur problemorientierten Datenaufbereitung kann die Unternehmensmodellierung herangezogen werden /9/.

Die Unternehmensmodellierung beschreibt wie das Unternehmen vorzugehen gedenkt und wie es produziert. Es beschreibt ausserdem die grundlegenden Aktivitäten mit den Charakteristiken Identifikation, Zustand und Verhalten, und deren Beziehungen in der notwendigen Tiefe. mit dem Ziel die Effektivität und die Effizienz zu steigern.

Das Modell ist der explizite Ausdruck unseres Verständnisses eines wirklichen Systems oder einer Situation /11/.

Ein Unternehmensmodell kann grundsätzlich aus zwei verschiedenen Sichten betrachtet werden:

- Produktesicht: Die Produktesicht zeigt die zur Herstellung notwendigen Prozesse eines Produktes.
- Prozesssicht: Analog zur Betrachtung von Produkten und den dahinterstehenden Prozessen können einzelne Prozesse oder Prozessgruppen mit den zugehörigen Produkte betrachtet werden.

Beide Sichten sind notwendig und können gegenseitig voneinander abgeleitet werden.

4. Umsetzung des Konzeptes in der Elektronikindustrie

Die nachfolgend aufgeführten Realisierungsbeispiele beziehen sich im Besonderen auf Stückguthersteller.

Zur Visualisierung und Bearbeitung von Produkt-, Prozess und Betriebsbilanzen und zur Bildung von Kennzahlen auf unterschiedlichen Ebenen ist die EDV-unterstützte Unternehmensmodellierung ein sehr geeignetes Werkzeug. In einem Unternehmen der Elektronikbranche wurde versucht mit Hilfe des beschriebenen Konzeptes, die Herstellprozesse eines Telecom Test Systems mit der Unternehmensmodellierung (Design/I-DEF) abzubilden. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Modell. Das Erstellen einer Sachbilanz mit Hilfe des erwähnten Bilanzierungskonzeptes und der Unternehmensmodellierung kann auf der Basis vorhandener betrieblicher Informationen weitgehend automatisiert erfolgen. Auf der Basis von Stücklisten,

Operationsplänen und Ablaufbeschreibungen ist es möglich mit definierten Schnittstellen mit minimalem Aufwand Sachbilanzen zu generieren. Probleme bestehen jedoch bei noch nicht vollständig erfassbaren Produkt- und Prozessdaten. Zurzeit ist die ökologische Prozessbeschreibung noch in Bearbeitung. Ausserdem ist das Modellierungsprogramm Design/I-DEF nicht auf die Modellierung ökologischer Verhältnisse ausgerichtet. Die markantesten Ergänzungen für eine ökologieorientierte Modellierung mit Design/I-DEF sind einerseits die Forderung nach gliederbaren Input- und Outputströmen (ICOMs) und andererseits die Verknüpfung von Inputströmen mit Outputströmen innerhalb der Aktivitäten.

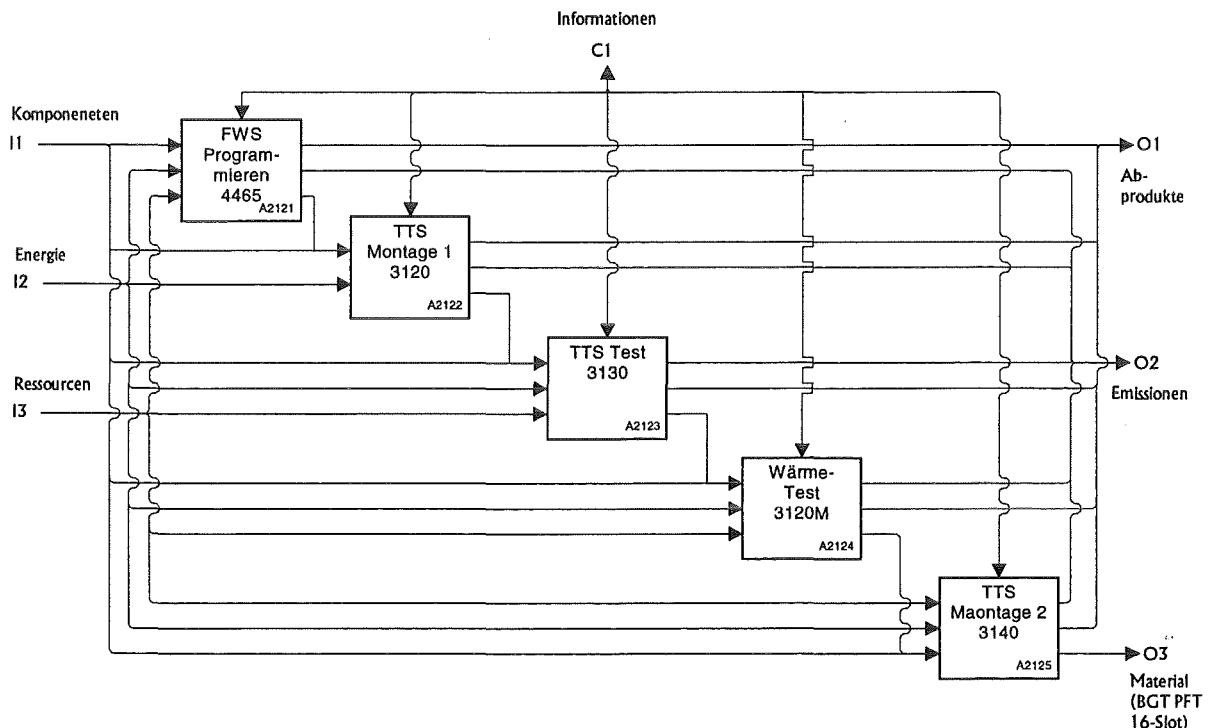


Abb. 4: Ausschnitt des ökologieorientierten Unternehmensmodells

Gelingt die Modellierung von Herstellprozessen im ausreichendem Masse, kann die Unternehmensmodellierung auch sinnvoll in den Planungsprozess einfließen. Sind einmal Produktvarianten und die zugehörigen Prozesse bekannt, kann mit Hilfe der Unternehmensmodellierung die zu erwartende Umweltbelastung mit Design/I-DEF simuliert werden. Entsprechende organisatorische Massnahmen bei der Produktentwicklung sind dazu erforderlich [7].

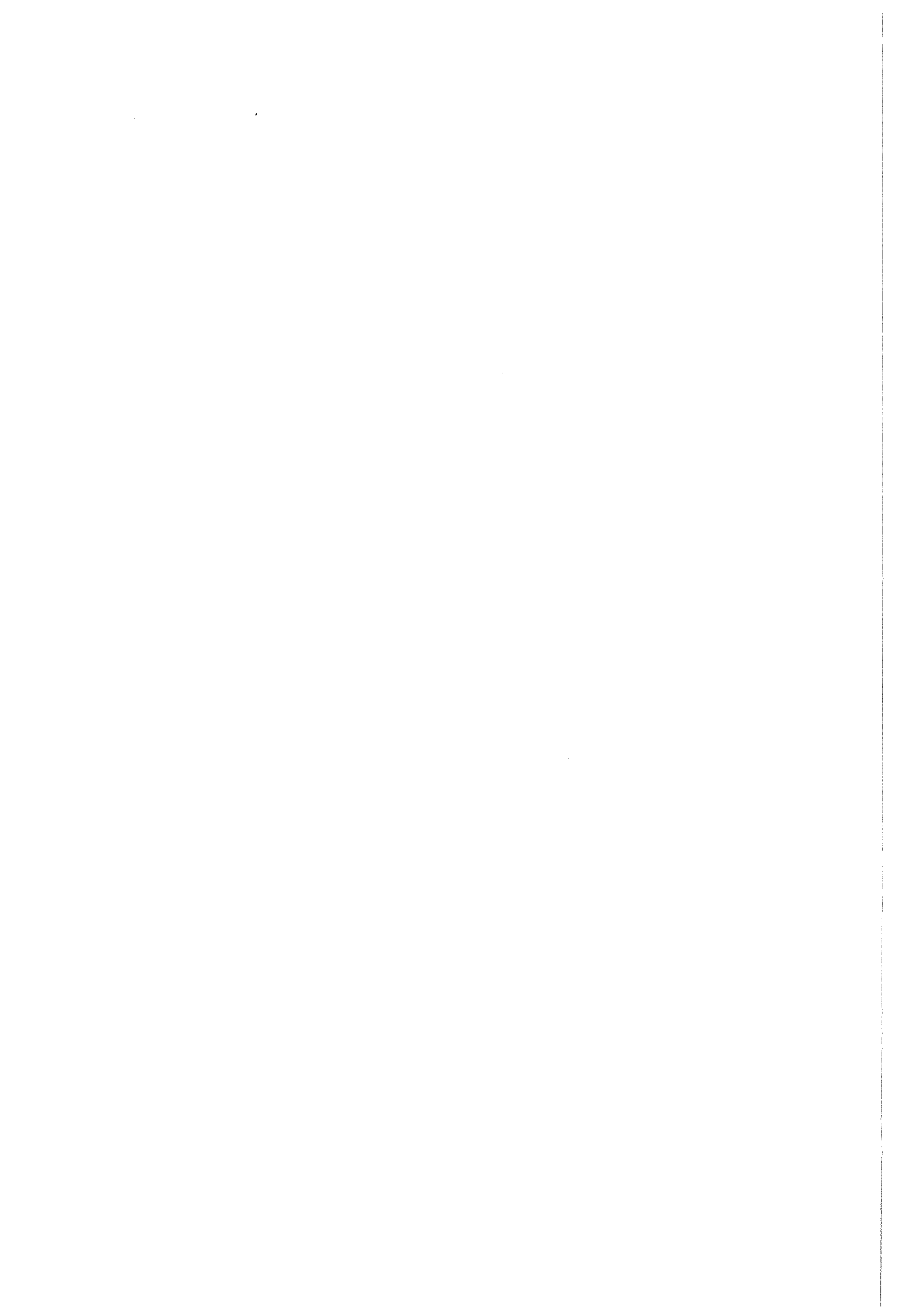
5. Schlussfolgerungen

Die Anwendung des Konzeptes der qualifizierten Sachbilanz und der integrierten Unternehmensmodellierung kann erfolgreich zur Verbesserung der Öko-Performance angewendet werden. Erste Praxiserfahrungen unterstreichen diese Aussagen. Künftige Anstrengungen konzentrieren sich auf die ökologische Anpassung der EDV-unterstützten Unternehmensmodellierung mit Design/I-DEF. Ausserdem sind mögliche Formen der ökologischen Prozessbeschreibung eingehender zu untersuchen und zu überprüfen.

Neben der Erfassung, und dem Aufbereiten ökologischer Daten kommt der Kommunikation eine wichtige Funktion zu. Durch die Integration der ökologieorientierten Daten in das betriebliche Informationssystem können in allen Planungs- und Entscheidungsinstanzen ökologieorientierte Informationen verfügbar gemacht werden. Voraussetzung für diese Integration sind organisatorische Strukturveränderungen/13/.

Literatur:

- /1/ ISO/TC 207/SC 4 N 141 Working Draft ISO/WD 14031.3 Environmental Performance Evaluation, 1995.
- /2/ ISO/TC 207/SC 5: Committee Draft ISO/CD 14040.3 Life Cycle Assessment - Principles and framework, 1995.
- /3/ ISO/TC 207/SC 6 N80: Terms and definitions, 1995.
- /4/ ISO/TC 207/SC 1: Draft International Standard ISO/DIS14001 Specification with guidance for use, 1995.
- /5/ ISO/TC 207/SC 1: Draft International Standard ISO/DIS14004 General guidelines on principles, systems and supporting techniques, 1995.
- /6/ ISO/TC 207/SC 5 N 68: Committee Draft ISO/CD 14041 Life Cycle Assessment - Principles and guidelines, 1995.
- /7/ Züst, R., Caduff, G.: Methods for Continual Improvement of Products and Processes, PROLOMAT '95, International Federation for Information Processing. Chapman & Hall, London 1995.
- /8/ Cruse C., Leppelmann S.: Neuronale Netzze in: Informationstechnik FB/IE 44 (1995) 4.
- /9/ Plötz A.: Die ökologische Dimension der Unternehmensmodellierung. Zürich,: ETH-Diss.-Nr. 11'065, 1995.
- /10/ Hallay H., Pfriem R.: Öko-Controlling. Campus Verlag 1992.
- /11/ Flatau U.; Wüstenfeld D.: Framework for Enterprise Modeling. DIN 96.5.1 input for ISO/TC 184/SC 5/WG 1, 1992.
- /12/ Züst R. Caduff G.: ISO 14000 - Die Bedeutung von EPE und LCA. SNV-Tagung Umweltmanagement-Systeme gemäss ISO, 1995.
- /13/ Plötz A., Ahbe S., Züst R.: Enterprise Modeling and Ecological Assessment as Instruments for the Development of Environmentally Compatible Products and Processes. 2. International Seminar on Life Cycle Engineering, 1994.



**8 -exupro- zur Problematik der Bewertung
heterogener Informationen am Beispiel der
Umweltbewertung alternativer Produktionspläne.**

Müller, M.

Diskussionsbeitrag:

— exupro —

zur Problematik der Bewertung heterogener Informationen am Beispiel der Umweltbewertung alternativer Produktionspläne

M. Müller

Universität Bremen, FB Informatik, AG-KI

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes exupro wird in Kooperation der Universität Bremen mit dem Ingenieur- und Beratungsbüro ibek und dem Bremer Institut für Betriebs-technik und angewandte Arbeitswissenschaften (BIBA) ein prototypisches System entwickelt, das eine Koppelung eines Produktionsplanungssystems mit einem Unterstützungssystem für Bewertungsvorgänge realisiert.

Ziel dieses Vorhabens ist die Bewertung alternativer Produktionspläne nach ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. Dazu ist es einerseits eine Zusammenführung von den zur Bewertung erforderlichen Daten und Informationen zu ermöglichen. Andererseits müssen Bewertungsmodelle erstellt werden, die es erlauben, unterschiedlich strukturierte Teilpläne miteinander vergleichen und bewerten zu können. Als Grundlage für das Subsystem, daß die Bewertungsvorgänge unterstützen soll, wird das System EXCEPT verwendet. Gerade in der Domäne umweltverträglicher Produktion erzeugen Bewertungsmaßstäbe unterschiedlicher Qualitäten Konflikte bei der Erzeugung vereinheitlichender Bewertungsmethoden.

In diesem Diskussionsbeitrag sollen anhand konkreter Probleme aus diesem Umfeld die methodologischen Probleme der Bewertungen an sich gebündelt dargestellt und einige Lösungsansätze diskutiert werden.

1 Einleitung

Die Domäne "Umwelt" ist in hohem Maße "weich". Insbesondere bei der Bewertung von Umweltauswirkungen spielen eine Unmenge möglicher Ausprägungen eine Rolle; diese werden in unterschiedlichem Umfang und verschieden scharf zu bewerten versucht. Dieses Dilemma ist wohlbekannt und Grund unzähliger ("philosophischer") Diskussionen über Machbarkeit und mögliche Formen einer Bewertung.

Im Rahmen eines anwendungsorientierten Projektes, das die Implementation eines funktionsfähigen Prototypen zur Bewertung alternativer Produktionspläne anstrebt, sind Diskussionen dieser Art nur bedingt hilfreich. Vielmehr muß für einen bestimmten kleinen Weltausschnitt ein statisches, verbindliches Bewertungsmodell erstellt werden, das den Anforderungen genügt. Das Projekt *exupro* (s. [RMH⁺96]) hat sich genau dies zum Ziel gesetzt. Es hat sich jedoch gezeigt, daß auch unter der pragmatischen Herangehensweise essentielle Probleme von Bewertungen nicht vermeidbar sind. Diese gebündelt darzustellen und Lösungsansätze zur Diskussion zu stellen, ist Ziel dieses Beitrags.

2 Bewertungsmodelle

Unter einer Bewertung wollen wir eine Zuordnung einer konkreten Evidenz auf eine Wertaussage verstehen. Dies impliziert bereits einige Anforderungen an bewertbare Evidenzen:

1. Evidenzen müssen durch eine Menge von

- charakteristischen und
- rauschfrei meßbaren

Merkmale beschrieben werden können.

2. Die Zuordnung auf eine Wertaussage impliziert die Existenz eines

- Wertmaßstabes sowie einer
- Zuordnungsvorschrift.

Darüberhinaus ist die Motivation für das Bewertungsvorhaben von Bedeutung: Ein und derselbe Bewertungsmaßstab kann unter verschiedenen Gesichtspunkten verwendet werden.

Bewertungen nehmen im alltäglichen Leben eine wichtige Stellung ein: Sie sind Grundlage fast aller Entscheidungsprozesse. Muß zwischen zwei Alternativen gewählt werden, so sind die Alternativen hinsichtlich ihrer Güte bzgl. des geplanten Zweckes zu bewerten. Die *relative* Bewertung "*a* ist besser als *b*" kann dann im Entscheidungsprozeß Berücksichtigung finden.

Diese Betrachtungsweise hilft, eines der großen Probleme in der Thematik allgemeiner Bewertungen zu umgehen: Durch Beschränkung auf *relative* Bewertungen, deren Maßstab streng definiert werden kann (auch wenn dieser Maßstab umstritten sein kann) gibt man den Anspruch, *absolute* Bewertungen generieren zu können, bewußt auf. Dies bedeutet, daß Fragen der Art "Ist *a* gut?" im Kontext der folgenden Betrachtungen nicht zulässig sind — und sich somit die (philosophische) Frage nach allgemeingültigen Bewertungsmaßstäben nicht stellt.

Es sei nochmals betont, daß der Wertmaßstab in Verbindung mit dem Bewertungsziel essentieller Bestandteil des Bewertungsmodells ist. Seine Struktur findet Ausprägung in der Definition der Bewertungsfunktionen, die analog zum Begriff des Bewertungszieles Niederschlag in den Bewertungshorizonten finden¹. Die Verwendung von Bewertungshorizonten demonstriert das gravierendste Problem bei Bewertungen an sich: Ein Produkt *a* kann unter ökologischen Gesichtspunkten besser sein als ein Produkt *b*, wenn es umweltverträglicher hergestellt werden kann. Unter ökonomischen Gesichtspunkten mag jedoch Produkt *b* günstiger herzustellen sein als *a*. Die Frage, welches Produkt hergestellt oder welcher Produktionsweg gewählt wird, läßt sich durch die Heterogenität der Bewertungsanliegen nicht eindeutig bewerten. Selbst wenn sich das Unternehmen zwischen den Grundsätzen

1. So ökonomisch wie möglich und ökologisch wie nötig
2. So ökologisch wie möglich und ökonomisch wie nötig

entscheiden kann, ist in einer konkreten Entscheidungssituation die Frage, ob verminderter Schadstoffausstoß um den Betrag *x* pro produziertem Teil oder ein um *y* niedrigerer Stückpreis "besser" ist.

2.1 Formale Bewertungssysteme

In erster Näherung stellen sich Bewertungen als *Funktionen* dar:

$$eval : Obj \rightarrow Val$$

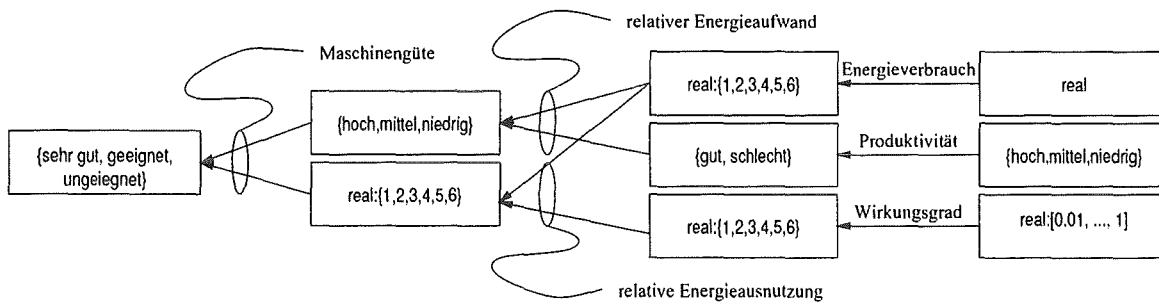
Diese funktional pragmatische Herangehensweise ist Grundlage des Expertensystems EXCEPT², das im Rahmen von *exupro* Verwendung finden wird:

Durch eine definierte Menge von Indikatoren (Features) werden Bewertungsgegenstände charakterisiert. Jeder dieser Indikatoren wird gemäß seiner Ausprägung (reellwertige Meßwerte oder diskrete Zustandsbeschreibungen) durch Skalen oder Tabellen in eine Wertstufenmenge abgebildet. Auf diesen Wertstufenmengen lassen sich weitere *n*-stellige Funktionen als logische (diskretwertige Tabellen) oder arithmetische (reellwertige Berechnungen) Aggregationen definieren, so daß sich eine Baumstruktur wie in Abb. 1 ergibt.

Bei näherem Hinsehen ergeben sich jedoch zwei problematische Aspekte: Zum einen muß festgehalten werden, daß sich die Menge der möglichen Bewertungen mit den verschiedenen Bewertungsfunktionen im Allgemeinen ändert, selbst wenn die Wertstufenmengen isomorph

¹Der Einsatz eines bestimmten Stoffes in der Produktion läßt sich z.B. mit Wertaussagen *a*, *b* oder *c* bewerten. Während Stoff *x* unter ökonomischen Gesichtspunkten mit *a* zu bewerten ist, ist er nach dem gleichen Maßstab *x* ökologisch als *c* zu bewerten.

²Expert System for Computer Aided Environmental Planning Tasks, IBM Deutschland Entwicklung GmbH.



Die Kästen repräsentieren jeweils Indikatorwerte (ganz rechts) oder Wertstufenmengen mit Elementen wie angegeben. Zwischen diesen Mengen sind folgende Funktionen definiert:

1. Energieverbrauch: $\mathbb{R} \rightarrow \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$
realisiert durch eine Skala auf \mathbb{R} mit den geordneten Intervallen 1 bis 6.
2. Produktivität: $\{ \text{hoch, mittel, niedrig} \} \rightarrow \{ \text{gut, schlecht} \}$
realisiert durch eine Tabelle 'hoch' \rightarrow 'gut', 'mittel', 'niedrig' \rightarrow 'schlecht'.
3. Wirkungsgrad: arith. Transformation; Normierung von $[0.01, \dots, 1]$ auf $[1, \dots, 6]$.
4. relativer Energieaufwand: $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \times \{ \text{gut, schlecht} \} \rightarrow \{ \text{hoch, mittel, niedrig} \}$
logische Aggregation; z.B. "Wenn Energieverbrauch $\in \{3, 4\}$ und Produktivität = 'gut', dann 'mittel', sonst 'schlecht'".
5. relative Energieausnutzung: arithmetische Aggregation durch Maximum, Durchschnitt etc.
6. Maschinengüte:
 $\{ \text{hoch, mittel, niedrig} \} \times \{ 1, 2, 3, 4, 5, 6 \} \rightarrow \{ \text{sehr gut, geeignet, ungeeignet} \}$

Abbildung 1: Ein EXCEPT-Bewertungsmodell

sind oder die Elemente gar dieselben Namen tragen³. Zum anderen erscheinen komplexe Bewertungen als Verknüpfungen der einzelnen Bewertungsrelationen; womit sich die Frage stellt, ob und wie sich zwei jeweils beliebige Bewertungen aggregieren lassen. Diese Fragen lassen sich wie folgt umformulieren:

1. Sei eine Menge $\{a, b, c\}$ möglicher Bewertungsergebnisse. Diese Menge sei Wertemenge zweier verschiedener Bewertungsfunktionen $eval_1$ und $eval_2$.
Sind dann die Aussagen a, b, c bezüglich der Bewertungen $eval_1$ und $eval_2$ gleich oder überhaupt vergleichbar?
2. Seien zwei Bewertungen unterschiedlicher Natur.
Wie kann darüber sinnvoll ein gemeinsamer Bewertungsmaßstab definiert werden?

Eine Bewertung $eval$ von Evidenzen ist — wie bereits informell festgehalten — eine Abbildung einer konkreten Instanz auf eine Wertstufe. Die Definition einer Bewertungsfunktion kommt einer Partition der Menge aller möglichen Evidenzen gleich; d.i. eine Äquivalenzrelation \equiv . Die einzelnen Blöcke dieser Partition erhalten die Namen von Wertstufen. Die Berechnung einer Bewertungsfunktion bedeutet dann nichts anderes, als für eine Evidenz x den Namen von $[x]_{\equiv}$ auszuwerten. In einer anderen Ansicht erscheint die Bewertungsfunktion als Interpretationsfunktion, die Evidenzen in einem Modell \mathcal{B} interpretiert. Dabei sind die Eigenschaften von \mathcal{B} die gleichen wie oben erwähnt; darüberhinaus jedoch fällt es in dieser Anschauung leichter, eine Ordnung oder gar Metrik auf den Bewertungsstufen anzunehmen. In Abb. 2 sind die beiden Interpretation von Wertstufenzuordnungen als Funktionen und Äquivalenzrelationen veranschaulicht.⁴

Eine komplexe Bewertung stellt sich als Verknüpfung mehrerer Bewertungen dar; sie ist daher eine n -stellige Funktion auf den Wertstufen der Bewertungen $eval_i : E_i \rightarrow W_i$ mit $i = 1, \dots, n$:

$$eval : W_1 \times \dots \times W_n \rightarrow W$$

Umgekehrt bedeutet die Interpretation der Bewertung als Relationen, daß der Evidenzenraum unter verschiedenen Partitionierungen betrachtet wird. Aggregationen sind dann durch Vereinigungen über die Schnittmengen der Blöcke definiert. Wir betrachten folgendes Beispiel: Seien vier Evidenzen $e(x, y)$ mit $x, y \in \{0, 1\}$. Dazu existieren zwei Bewertungsfunktionen

³Im Klartext bedeutet dies, daß es sich bei den drei Mengen $real: \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ aus Abbildung 1 tatsächlich um drei verschiedene Mengen handelt, wie eine relationale Betrachtungsweise verdeutlicht.

⁴Metriken aus dem funktionalen Ansatz lassen sich jedoch einfach auf den relationalen Ansatz übertragen, indem über die Blöcke der Partition Inklusionsbeziehungen gelegt werden: 'sehr gut' \subseteq 'gut' $\subseteq \dots \subseteq$ 'ungenügend'. Bei Implikationen dieser Art ist jedoch stets auf die zur Transitivität im Gegensatz stehende natürlichsprachliche Bedeutung der verwendeten Namen von Äquivalenzklassen zu achten: Etwas 'Gutes' "ist" normalerweise nicht ("nur") 'ausreichend'. Für $x \in \mathcal{B}$ ist also der Name der kleinsten Vereinigungsmenge über die geordneten Blöcke, die x enthält, die adäquate Beschreibung.

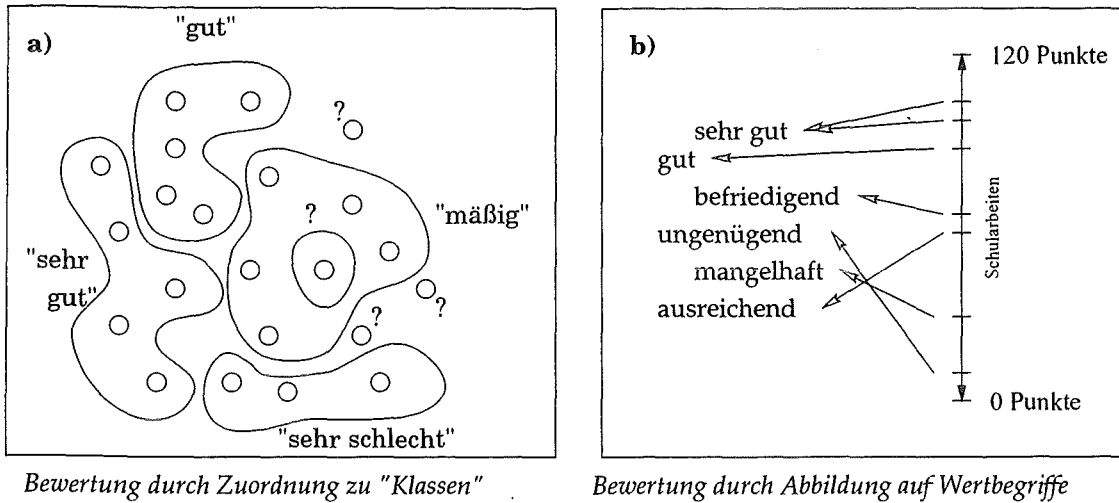


Abbildung 2: Bewertungen als Äquivalenzrelationen und Funktionen

der Art

$$eval_1(e(x, y)) = \begin{cases} a, & \text{wenn } x + y < 2 \\ b, & \text{wenn } x + y = 2 \end{cases}$$

$$eval_2(e(x, y)) = \begin{cases} c, & \text{wenn } x + y = 0 \\ d, & \text{wenn } x + y > 0 \end{cases}$$

Die Aggregationsfunktion $eval_3 : \{a, b\} \times \{c, d\} \rightarrow \{e, f\}$ als

$$eval_3((x, y)) = \begin{cases} e, & \text{wenn } x = a \wedge y = d \\ f, & \text{sonst} \end{cases}$$

ergibt dann im Bezug auf die Eingangsgrößen die Klasse

$$\{e(x, y) | x + y = 1\}$$

Dies ist in Abbildung 3 veranschaulicht.

Das Problem komplexer Bewertungen ist die *Interpretation* der neuen Bewertungsergebnisse. Werden zum Beispiel unterschiedliche Bewertungskriterien zur Bewertung der Qualität eines Fließgewässers betrachtet, so sind — auch wenn sich die untergeordneten Wertsysteme unterscheiden — Aussagen über die Nutzbarkeit des Wassers als Trink- oder Nutzwasser möglich. Da alle Evidenzen (verschiedene Schadstoffe, Fließgeschwindigkeit, Temperatur, Sauerstoffgehalt, Trübheitsgrad etc.) hinsichtlich Ihren Aussagen vergleichbar sind ("Einfluß auf die gesundheitliche Verträglichkeit"), fällt eine komplexe Bewertung hier relativ einfach. Eine

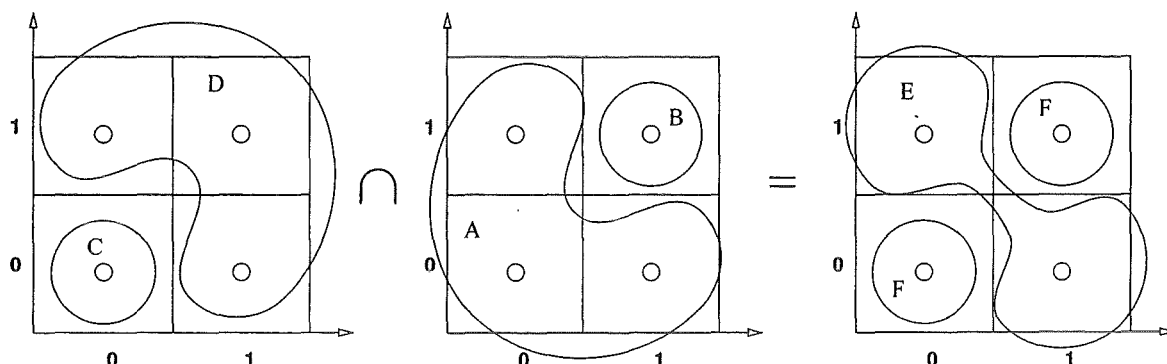


Abbildung 3: Komplexe Bewertungen

Aggregation bzw. eine (komplexe) Bewertung höherer Ordnung findet nun auf den Ergebnissen niedrigerer Bewertungen statt. Die dazu zu erstellende n -stellige Bewertungsfunktion läßt sich einfach als eine $n \times n$ -Matrix darstellen, in deren Zellen jeweils das Ergebnis der komplexen Bewertung steht.

3 Dilemmata der Bewertungsmethodik

Nach der Einführung werden in diesem Abschnitt Bewertungsmodelle, ihre Konstruktion und dabei entstehende Probleme diskutiert.

3.1 Nicht-Vergleichbarkeit: Die Problematik des "Apfel-Birnen" Vergleichs

Die eher formale Herangehensweise an die Bewertungsmethodik verschleiert leicht die heterogenen Informationen inhärente Problematik bei der Aggregation qualitativ verschiedener Aussagen zu einer neuen Aussage. Die komplexe Aussage

Der Wille ist stark und das Fleisch ist schwach

ist an sich keine in einem Entscheidungsprozeß hilfreiche Wertaussage. Aggregiert man die beiden Aussagen jedoch zu

Der Mensch ist fehlbar.

so ist "Fehlbarkeit" zu einem vereinheitlichendem⁵ Maßstab geworden, der in einen Bewertungsprozeß einfließen kann. Grund hierfür ist, daß im Gegensatz zum Beispiel in Abschnitt

⁵und dies tatsächlich im Sinne von "normierend"!

2.1 kein gemeinsamer Bewertungshorizont (“Einfluß auf die gesundheitliche Verträglichkeit”) gefunden werden kann.

Aus der Anwendungsdomäne des *exupro*-Projektes ergibt sich das Problem, eine Wichtung zwischen ökologischen und ökonomischen Wertaussagen vorzunehmen. Eine einfache Methode, ökonomische Wertaussagen mit ökologischen Wertaussagen durch Aggregation in einem Bewertungsbaum zusammenzufassen ist eine einfache Identität, die komplexe Wertstufennamen erfordert:

$$eval : N \times M \rightarrow N \times M \quad \text{mit} \quad eval(x, y) = \langle x, y \rangle$$

Damit ist rein technisch das Problem gelöst; das Problem der Interpretation der Tupel $\langle x, y \rangle$ bleibt jedoch bestehen. Hier bleibt die Interpretation dem Nutzer überlassen. Dieses Problem kann jedoch z.B. durch eine explizite Definition eines Bewertungsstandpunktes, der Niederschlag in einer Gewichtungsfunktion auf Matrizen aus $M \times N$ findet, aufgelöst werden. Ob jedoch ein solcher Standpunkt definierbar ist und wie eine adäquate Bewertungsmatrix aussieht, ist vorerst fraglich.

Dieses wirklich essentielle Problem der Bewertung kann nicht ohne weiteres gelöst werden:

1. Zum Großteil kann die aggregierende Funktion gar nicht definiert werden, weil die Qualität der Teilaussagen verschiedener Art ist. Die Aggregation der heterogenen Information gelingt daher nur in einer starken kontextuellen Abhängigkeit.
2. Selbst die Definition kontextabhängiger Aggregationsfunktionen fällt meist sehr schwer, weil sie die Definition expliziter — wenn auch nur lokal gültiger — Bewertungsmaßstäbe erfordern.
3. Kontextabhängige Aggregationen sind natürlicherweise nicht allgemeingültig und können daher nicht als allgemein anerkannte Maßstäbe akzeptiert werden.
4. Vergleiche von Bewertungsergebnissen, die sich auf unterschiedliche Aggregationsfunktionen stützen, sind daher aus demselben Grund wieder nicht möglich.

Am Beispiel der *exupro*-Domäne lassen sich diese Facetten wie folgt erläutern:

1. Die Auswahl einer Maschine für einen Produktionsprozeß kann erfolgen aufgrund ihrer ökonomischen Qualitäten: Anschaffungskosten, laufende Kosten, Effektivität und Materialverschleiß sowie Abfall lassen sich stückzahlbezogen bilanzieren und erlauben somit eine Aussage der Art

Die Rentabilität der Maschine x im Prozeß p bei der Herstellung von o ist in der Firma f mit y zu bewerten.

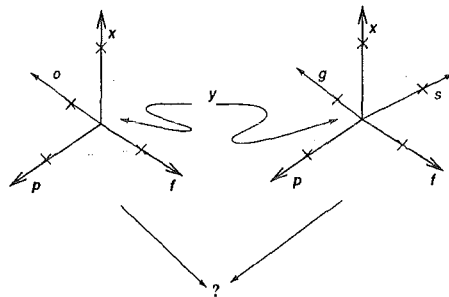
Dabei kann y eine rein monetäre Größe sein: der entstehende Stückzahlpreis.

Eine ökologische Bewertung muß z.T. sogar schon von der Normierung auf Stückzahlen abweichen; die Verwendung eines einzigen bestimmten Betriebstoffes kann — unabhängig von dessen Menge — bereits als “K.O.-Kriterium” den Einsatz der Maschine als ökologisch nicht vertretbar erscheinen lassen. Eine Wertaussage wie

Der Einsatz der Maschine x im Prozeß p im Produktionsumfeld der Firma f hat Auswirkungen nach den Richtlinienbestimmungen/ Gesetzen g auf das Ökosystem s Auswirkungen, die als y zu bewerten sind.

Allein die diesen beiden Bewertungen zugrundeliegenden Bewertungshorizonte sind derart verschieden, daß ein Vergleich und erst recht eine vergleichende Bewertung scheitern muß. (s. Abb. 4)

2. Entscheidet sich eine Firma, nach welchen Methoden die Umweltverträglichkeit von Produktionsprozessen gemessen werden soll, bedeutet dies, daß ein solcher Maßstab technisch umgesetzt werden muß. Dabei wird zum einen die im nächsten Abschnitt angesprochene Disjunktionsproblematik akut; zum anderen kann von vorneherein durch Einführung eines geeigneten Kennzahlensystems dieses Problem umgangen werden. Viele Ansätze bedienen sich gerade dieses Hilfsmittels. Dabei ist darauf zu achten, daß das Kennzahlensystem alle auftretenden Zustände zu beschreiben in der Lage ist (also vollständig ist) und eine korrekte Arithmetik aufweist. Im Falle von Systemen wie z.B. Toxizitätsäquivalenten ist die Arithmetik durch eine einfache Summierung realisiert — dementsprechend mehr Aufwand muß in der Zuweisung der Zahlwerte auf Evidenzen getrieben werden.
3. Ein großer Nachteil solcher Kennzahlensysteme ist jedoch, daß sie streng domänenspezifisch sind. Dies erklärt sich ganz einfach durch ihren lokalen Charakter um Kontextprobleme wenigstens in einem kleine Feld von Bewertungen zu meistern. Nur selten sind Kennzahlensysteme bereits vorgegeben (z.B. durch Gesetze oder Umweltrichtlinien) oder auch nur allgemein anerkannt (Transportkennziffern). Werden auf einen Problembereich hin optimierte Kennzahlensysteme entwickelt, so können diese kaum in auch nur leicht verschiedene Domänen übernommen werden. Darüberhinaus ist die Anerkennung von Bewertungsergebnissen, die unter ihrer Anwendung zustande gekommen sind, durch Dritte unsicher.
4. Daß Teilbewertungen, die durch verschiedene Kennzahlensysteme entstanden sind, nicht mehr einheitlich aggregierbar sind, ist offensichtlich. Auch der Versuch, für zwei Kennzahlensysteme $\langle K_1, f_1 \rangle$ und $\langle K_2, f_2 \rangle$ mit den Kennzahlbereichen K_i und den arithmetischen Funktionen f_i ein neues System durch Produktbildung zu generieren, wird im Allgemeinen scheitern, da die Semantik einer Ordnung auf den $\langle k_1, k_2 \rangle$ wiederum unklar ist.



Beiden Bewertungsanliegen sind die Dimensionen Maschine x , Prozeß p und Firma f gleich; sie bestimmen primär den Wert y . Die Bewertung y hängt jedoch ebenso ab von den Variablen Endprodukt o aus der ökonomischen Bewertung sowie Gesetzgebung g und Ökosystem s .

Man kann auch durch die beiden Bewertungen eigenen Dimensionen p , f und x und einen dreidimensionalen Raum aufspannen, in dem quasi Prototypen für Bewertungen zu finden sind. Ein Punkt darin würde weiter spezialisiert durch den mit diesem Punkt parametrisierten Unterraum, der durch o oder g und s oder o , g und s aufgespannt wird.

Abbildung 4: Ökonomische vs. ökologische Bewertungen

Ein Problem das nicht so offensichtlich ist, aber noch schwieriger zu behandeln ist, offenbart sich in der Tatsache, daß auch innerhalb der Teilbewertungssysteme immer wieder nicht vergleichbare Aussagen einander gegenüberstehen. Es ist nicht ohne weiteres zu klären, ob eine Grundwasserverschmutzung durch 1 Liter Altöl "schlimmer" ist als eine Emission von 7mg Schwefeldioxid pro m^3 Luft; wogegen ökonomische Werte faßbar und vergleichbar sind. Selbst die tiefer wirkende Ausdifferenzierung ökologischer Merkmale (in obigem Beispiel in Grundwasserverschmutzung oder Luftverschmutzung) kann das Problem nicht umgehen:

1. Zum einen bleibt fraglich, in welchem Verhältnis Grundwasser- und Luftverschmutzung bzgl. der Umweltauswirkungen stehen,
2. und zum anderen ist nicht gewährleistet, daß nicht dasselbe Problem nochmals eine Ebene tiefer erscheint.

Einzigster Ausweg aus dieser Situation ist ein normatives Verfahren; s. dazu Ansätze in Abschnitt 3.

3.2 Die Problematik disjunktiver Strukturen

Ebenfalls problematisch werden Bewertungen, bei denen nicht von vornherein die genaue Ausprägung feststeht:

In der *exupro*-Domäne stellt sich das Problem der Produktionsvarianten. Produktionsvarianten sind Bauteile oder Produkte, die in ihrer Funktionalität gleich sind, obwohl bei ihrer Herstellung verschiedene Teile oder Prozesse zur Anwendung kommen. Zum Beispiel können ein geschweißtes und ein geschraubtes Getriebegehäuse Produktionsvarianten darstellen; genauso aber verschiedene Schließmechanismen für Heckklappenschlösser bei Autos: Stufenheck und Fließheck in Verbindung mit oder ohne Zentralverriegelung erfordern vier Produktionsvarianten von funktional gleichen Schließmechanismen.

Soll zum Beispiel der abstrakte Vorgang „Montage eines Getriebegehäuses“ bewertet werden, so unterscheiden sich die in der konkreten Bewertung anliegenden Evidenzen. Das Verschweißen der Gehäuseteile ist grundsätzlich verschieden von dem Vorgang des Verschraubens; dieses wiederum ist ganz anders geartet als ein Komplettguß mit anschließenden Fräsarbeiten. Diese grundsätzlichen Unterschiede manifestieren sich z.B. in den Teilbewertungen für *Ozonbelastung* (Schweißen) und *Kühlschmiermittelverbrauch* (Fräsen), die nur für die jeweils tatsächlich verwendete Produktionsvariante relevant sind. Daraus ergibt sich für ein Bewertungssystem dieser Art eine wie in Abb. 5 dargestellte disjunktive Baumstruktur.

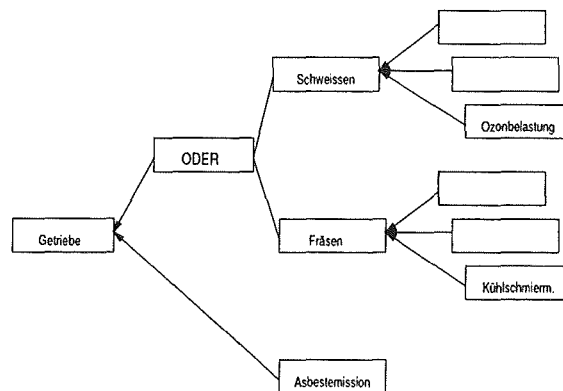


Abbildung 5: Disjunktive Bewertungsstruktur

Die Verarbeitung solcher disjunktiver Strukturen ist keine besondere kognitive Leistung, bringt jedoch das statische Bewertungsmodell ins Wanken. In der *exupro*-Domäne steht man daher vor der Wahl ein abstraktes Bewertungsmodell zu erstellen, das sowohl in Erstellung wie auch Verarbeitung aufwendig ist, oder aber ein spezielleres Modell für je eine Klasse ähnlicher Probleme zu erstellen.

1. EIN BEWERTUNGSMODELL FÜR ALLE PRODUKTIONSPLÄNE:

Das Problem ist, ein allgemeingültiges Bewertungsschema zu finden. Folge wird sein, wiederum aus Gründen der Normierbarkeit mit Kennziffersystemen arbeiten zu müssen. Außerdem wird bestimmt die Verwendung von disjunktiven Strukturen vonnöten.

2. EIN BEWERTUNGSMODELL FÜR JEDEN PRODUKTIONSPLAN:

Das Problem wird die (automatische) Generierung der Bewertungsmodelle; obwohl man sich dabei recht eng an Stücklisten und Arbeitsgangbeschreibungen halten kann. Vielmehr ergibt sich bei diesem Ansatz das Problem der prinzipiellen Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen, die durch unterschiedliche Bewertungsmodelle wieder in Gefahr gerät.

Durch die Bewertung von Produktionsplänen entsteht die Frage, wie verschieden geartete Produktionspläne von gleichen Bewertungsmechanismen bewertet werden können. Dieses Thema ist u.a. auch sehr stark im Kontext von Konfigurationssystemen (z.B. PLAKON) von Bedeutung ([DGK⁺94], [DGK⁺95]).

[Ker94] konstruiert aus der Überlagerung zweier alternativer Strukturbäume (Stücklisten) zur Produktion von Tragwagen einen sog. Gozintografen (s. Abb. 6) durch Vereinigung.

Betrachtet man A_1 und A_2 als Funktions-Varianten (d.h. Funktion A wird durch die beiden Instanzen A_1 und A_2 erfüllt), so ergeben sich unter diesem Gesichtspunkt disjunktive Strukturen: A_1 oder A_2 erfüllen die Anforderungen.

Analog lassen sich Bewertungen disjunktiv darstellen: Die Bewertung "Atemluftbelastung" kann sowohl für Schweiß- wie auch Gußteilvarianten durchgeführt werden. In beide können z.B. gemeinsame Module wie "Asbeststaubemission durch Entgraten" einfließen; unterschiedliche subordinierte Bewertungsmodule machen jedoch die Disjunktion erforderlich: "Schwebstaub durch Gußformerstellung" und "Ozonbelastung durch E-Schweißen" schließen einander durch die Produktionswege (auf dieser Ebene) aus. Dabei sind Disjunktionen in Stücklisten wesentlich enger an die bereits angesprochenen alternativen Produktionsgänge gebunden als zunächst vermutet: Es ist tatsächlich so, daß eine alternative Teilauswahl in Stücklisten (je nach Käuferspezifikation) direkt durch an die Stückliste annotierte Arbeitsgangbeschreibungen eine Änderung des Produktionsplanes bedingen.

Die oben angerissene Frage, ob die Konstruktion eines abstrakten Bewertungsmodells oder die Konstruktion vieler spezieller Bewertungsmodelle vorzuziehen ist, kommt somit der Frage gleich, auf welcher Ebene eine Explikation der Disjunktion durchgeführt werden soll bzw. ab welchen Knoten eine Überlagerung zu einem Gozintografen durchgeführt wird (s. Abb. 7): Im einen Extremfall kann direkt an den Blättern des Bewertungsbaumes eine Fallunterscheidung getroffen werden, was dann dem "abstraktesten" Bewertungsmodell entspricht; im anderen Extremfall werden die Disjunktionen bis zur Wurzel propagiert, um somit verschiedene Bewertungsmodelle zu erhalten.

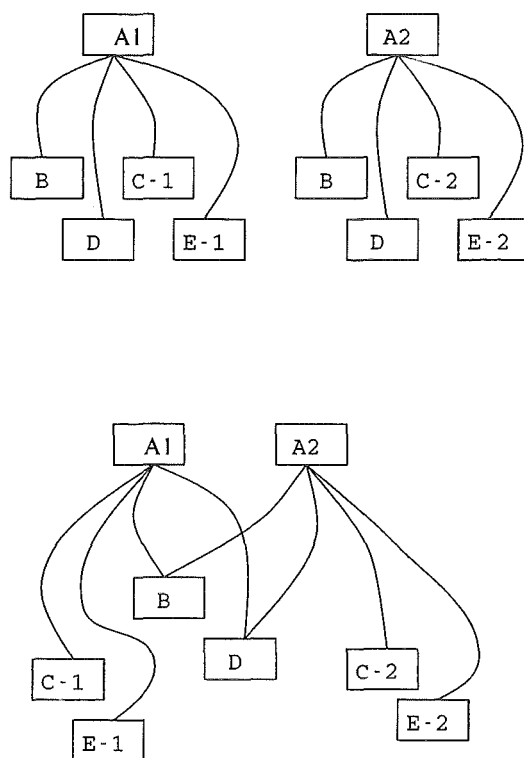


Abbildung 6: Gozintograph

3.3 Unschärfe: Die Problematik grober Bewertungen

Ein weiteres Problem bei der Erstellung von Bewertungsmodellen stellt sich bereits wesentlich früher; nämlich bei der Definition der einzelnen Bewertungsfunktionen an sich: Bewertungen sind nicht immer so scharf, wie die Begriffe Partition und Funktion vermuten lassen. Vielmehr sind im alltäglichen Bewerten Unschärfen — zumeist bezüglich der Partitionen im Modell — enthalten. Dies heißt, daß zwar eine Interpretation der Evidenz e vorgenommen wird, auch wenn das Konzept der Wertstufen (d.i. die Äquivalenzklasse $[I(e)_M]$) jedoch unscharf ist oder nicht scharf definierbar ist. Ein einfaches Beispiel dafür ist, daß für eine Wertstufenmenge $\{ \text{heiß, lau, kalt} \}$ nicht scharf definiert werden kann, wo z.B. “lau” aufhört, und wo “warm” beginnt. Man kann diesem Problem begegnen, indem man Bewertungsvorgänge im Rahmen solch qualitativ formulierter Wertstufenmengen durch regelbasierte Methoden abbildet. Der Nachteil liegt dabei auf der Hand: Anstatt mit numerischen Werten zu rechnen, begibt man sich auf eine rein symbolische Verarbeitungsebene, wodurch man unter Umständen einen Teil der in den Sachaussagen enthaltenen Informationen verliert.

Beobachtet man einen Experten bei der manuellen Bearbeitung von Bewertungen, in denen

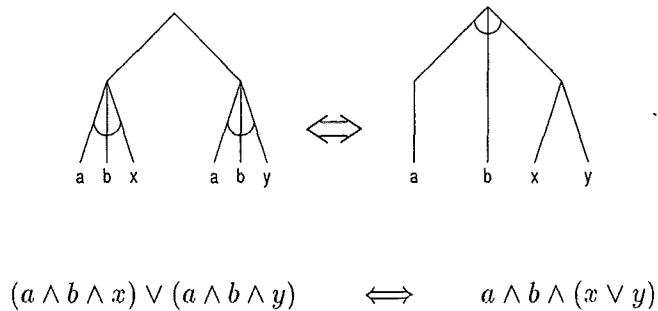


Abbildung 7: Äquivalente disjunktive Strukturen

solche qualitativen Zusammenhänge eine Rolle spielen, so erkennt man, daß die den qualitativen Begriffen zugrunde liegende Information in den Aggregationen mitgenommen wird. Dies läßt sich dadurch belegen, daß Experten in vielen Fällen Tendenzen, die den Begriffen anhaften, in höheren Aggregationsstufen der Bewertungsvorgänge weiterhin berücksichtigen. Die Modellierung dieser qualitativen Begriffe über die rein symbolische Darstellung in Bewertungsregeln wird also dadurch motiviert, daß man die anhaftende Information durch den Aggregationsschritt nicht einbüßen möchte.

Das Problem, das sich daraus direkt ergibt, ist die Frage, wie man in diesem Zusammenhang solche qualitativen Aussagen entsprechend modellieren kann. Ein möglicher Ansatz ist, die Informationen in fuzzy-logische Konzepte zu fassen und über den Umweg der Modellierung von Zugehörigkeitsfunktionen dem Problem gerecht zu werden. Wir werden dies im folgenden Abschnitt diskutieren.

4 Mögliche Auswege

Im letzten Abschnitt wollen wir bereits bekannte und neue Mechanismen zur Lösung der bisher dargestellten Probleme vorstellen und diskutieren.

4.1 Kennzahlssysteme

Ein weit verbreitetes System, das auf einmal alle Probleme nicht-kompatibler Bewertungsmaßstäbe und disjunktiver Strukturen zu erschlagen scheint, sind Kennzahlssysteme. Die Idee hinter Kennzahlssystemen ist ein künstliches Normierungssystem, das es erlaubt Informationen verschiedener Ausprägung einheitlich darzustellen. Ein einfaches Beispiel dafür ist eine Normierung von Kraftstoffverbrauch und Luftbelastung verschiedener Transportmittel auf

einen einheitlichen Maßstab. Dabei werden Liter Schiffsdiesel pro Seemeile und Register-tonne genauso wie Liter Kerosin pro Flugmeil und Kilogramm Luftfracht auf Liter Diesel pro Kilometer umgerechnet. Je nach Definition der Umrechnungsfunktion können auch Umweltbelastungen wie Flußgewässerbelastung oder Verunreinigung der hohen Luftschichten durch Turbinenabgase auf das Normmaß Liter/km umgerechnet werden. Sind nun die Kennzahlen (oder besser: -wertigkeiten) und die zurückgelegten Strecken aus einem Transport bekannt, so können die Kennzahlen berechnet und aufsummiert werden. Das Endergebnis ist eine Zahl, die den Transport absolut beschreibt. Ist eine Alternative denkbar, die in einer Bewertung mit geringerer Kennzahl resultiert, so ist diese besser.

Dennoch erscheint auch bei der Arbeit mit Kennzahlen hier auf anderer Ebene das Problem der Vergleichbarkeit erneut:

1. Die Aggregation zweier Aussagen aus verschiedenen Kennzahlssystemen erfordert die Definition eines neuen Systems.
2. Nachteile von Kennzahlssystemen sind jedoch, daß die Möglichkeit zur Dekomposition einer Kennzahlaussage in ihre qualitativen Komponenten nicht mehr gelingt.
3. Darüberhinaus sind Kennzahlssysteme nicht allgemein gültig — als künstliche Normierungssysteme bedeutet ihre Verwendung eine Antizipation von versteckten Bewertungsmaßstäben, die noch dazu durch die Arithmetik verschleiert werden.

Wir besprechen zunächst den letzten der drei angesprochenen Punkte:

Sogenannte Toxizitätsäquivalente können der Normierung von umweltschädigenden Substanzen dienen. Das System der Toxizitätsäquivalente ergibt sich aus der Betrachtung der verschiedenen Wirkungen einer Chemikalie; dies sind zum Beispiel letale Dosen, Mutagenität, Kanzerogenität, etc. und der Addition als arithmetische Operation. Sind die Werte LD50, Mutagenität etc. können Stoffen Wertigkeiten zugeordnet werden. Zusammen mit dem Wissen über die Menge, in der diese Substanz in den Stoffströmen eines Produktionsprozesses erscheint, kann ein Toxizitätsäquivalent (TE) errechnet werden; das TE eines gesamten Prozesses ergibt sich durch Summation aller TE's der verwendeten Stoffe. Ein Vergleich verschiedener Prozesse findet dann auf der Basis der resultierenden TE's statt.

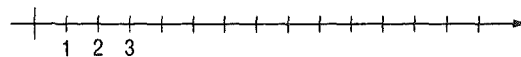
Die einzelnen Wertigkeiten für Stoffe sind durch die Formel, die LD50, Mutagenität etc. verrechnet, antizipiert; d.h. für jeden Benutzer des TE-Kennzahlsystems ist der Einfluß von LD50 auf die Gesamtbewertung gleich. Damit wird der Einsatz dieses Systems beschränkt.

Zum zweiten zieht die Verrechnung verschiedener Daten zu Zahlaussagen den Verlust von Einzelinformation mit sich: Angenommen, das TE eines Stoffes berechne sich nach einer Funktion $f : M_1 \times \dots \times M_n \rightarrow \mathbb{N}$ auf den Stoffmerkmalen M_i . Dann ist f nicht zwangsläufig injektiv; d.h. es kann zwei Stoffe mit gleichem TE geben; obwohl sie sich in mindestens einem M_i unterscheiden. Damit ist die Möglichkeit eines verlässlichen Rückschlusses von TE's

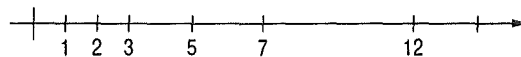
auf Wirkstoffe ausgeschlossen. Das gleiche Argument trifft auf die arithmetische Funktion zur Verrechnung von TE's zu. Damit ist die Frage, *warum* ein bestimmter Produktionsprozeß mit einem bestimmten TE bewertet worden ist nicht mehr zu beantworten und ein großer Vorteil der statischen, funktionalen Bewertungsmodelle (nämlich ihre Dokumentierbarkeit) geht verloren.

Aus dem zuerst diskutierten, dritten Punkt folgt direkt der erste: Die utilitaristische Auslegung einzelner Kennzahlssysteme wird im allgemeinen eine direkte Vergleichbarkeit verhindern und wieder die Definition eines neuen Systems mit den darunterliegenden Kennzahlssystemen als Merkmalen erfordern.

Trotz dieser Kritikpunkte haben sich Kennzahlssysteme als praktikable und handhabbare Systeme erwiesen; ihre Erstellung jedoch ist nicht einfach. Abschließend zum Thema Kennzahlssysteme möchten wir noch Zweierlei bemerken: Bei der Erstellung eines Kennzahlsystems muß eindeutig die Semantik der Zahlen und der daraufliegenden Ordnung festgelegt worden sein. Angenommen, die Kennzahlen würden durch eine Teilmenge der natürlichen Zahlen beschrieben:



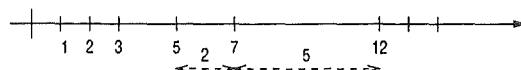
Dann ist eine relative Bewertung über Auswertung von \leq möglich. Die Frage ist jedoch, ob das Kennzahlssystem kontinuierlich ist; d.h. ob auch tatsächlich jede natürliche Zahl einen konkreten Bewertungsgegenstand repräsentiert, oder ob "Lücken" auf dem Zahlenstrahl vorhanden sind:



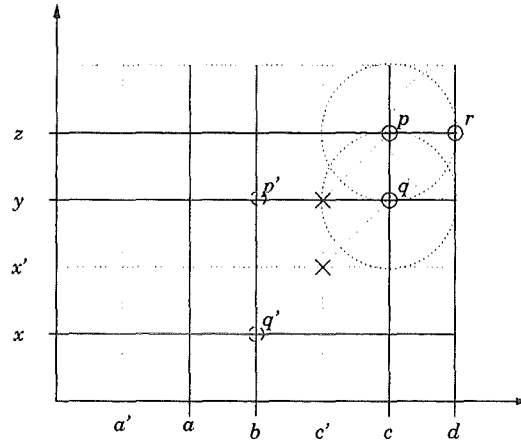
Diese Frage erscheint in ihrer Bedeutung marginal; hat jedoch recht große Auswirkungen auf die Interpretation von kennzahlbasierten Bewertungen. Sobald nämlich die Frage nach "nächstbesseren" Lösungen gestellt wird (eine Frage die im Spannungsfeld Ökonomie/Ökologie häufiger zu beobachten sein wird!) muß man sich entschieden haben, ob ein lückenhaftes Kennzahlssystem kontinuierlich oder diskretisiert zu interpretieren ist. Die "nächstbessere" Bewertung zu 5 wäre 4; da die dem Kennzahlssystem zugrundeliegende Funktion jedoch nicht zwangsläufig injektiv ist (s.o.), ist 4 nur eine scheinbare Lösung: es gibt keine Konstellation in unserem Evidenzenraum, die dieses Maß aufweist. Ein Ausweg daraus ist eine explizite Diskretisierung; so daß 3 die nächstbessere Lösung ist. Diese Diskretisierung jedoch verbietet qualitativ vergleichende Aussagen über mehrere Wertaussagen:

Ist 7 um so viel schlechter als 5 wie besser als 12 ?

Diese Formulierung zielt auf die Metrik ab, die auf dem Kennzahlstrang angelegt wird:



Problematisch wird die Verwendung von Kennzahlssystemen bei der Aggregation verschiedener Systeme:



Wir betrachten hierin zwei Kennzahlssysteme $a', a, b, c', c, d \in K_1$ und $x, x', y, z \in K_2$ mit den Ordnungen \leq_1 und \leq_2 und den durch die gepunkteten Linien angedeuteten "Lücken". Für die Aggregation zum Produkt

$$\bar{K} = \prod_{i=1}^n K_i$$

definieren wir eine neue Ordnung

$$\langle x_1, \dots, x_n \rangle \leq^* \langle y_1, \dots, y_n \rangle \iff x_i \leq_i y_i$$

Dieses Produkt ist oben dargestellt; die Differenz die wir als "Maßstab" im eindimensionalen Fall gewählt hatten, ersetzen wir dabei durch die euklidische Distanz:

$$\delta(\langle x_1, y_1 \rangle, \langle x_2, y_2 \rangle) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Bei der Arbeit in $K_1 \times K_2$ ergeben sich nun mehrere Probleme:

1. Bereits bei Anfragen über kontinuierliche Intervalle tauchen Fragen bzgl. der Ordnung auf: Ist p bereits besser als r , weil $c \leq_1 d$? Was ist der qualitative Unterschied zwischen p und $\langle d, y \rangle$ relativ zu r ?
2. Die nächste diskret streng bessere Lösung zu p ist p' ; die jedoch weiter entfernt ist, als die nächste kontinuierliche Lösung $\langle c', y \rangle$.
3. Der euklidische Abstand zwischen p und q beträgt 1; der Abstand der jeweils besseren Lösungen p' und q' jedoch 2. Wie läßt sich der wachsende Abstand in einem vergleichenden Bewertungsverfahren oder Erklärungsprozeß rechtfertigen?

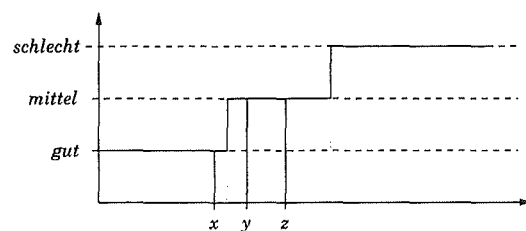
Zusammenfassend läßt sich festhalten:

1. Kennzahlssysteme sind künstliche Normierungssysteme.
2. Ihr Einsatz ist auf enge Bereiche eingeschränkt, in denen die dem Kennzahlssystem zugrundeliegenden Wichtungen (d.i. implizite Wertungen) akzeptiert werden können.
3. Kennzahlssysteme eignen sich nicht für Bewertungs- oder Bilanzierungssysteme, da ihre Aussagen qualitativ nicht eindeutig zu interpretieren sind (es sei denn durch Hinzunahme von Datenblättern und Rückrechnung).
4. Idealer Einsatzort für Kennzahlssysteme sind Anwendungen, in denen rein quantitative Aussagen von Bedeutung sind; so insbesondere bei Schwachstellenanalysen.

Zur Problematik von Metriken auf mehrdimensionalen Räumen im Kontext nicht vergleichbarer Aussagen s. auch [Bac94].

4.2 Kosten, Wahrscheinlichkeiten und Soft Sets

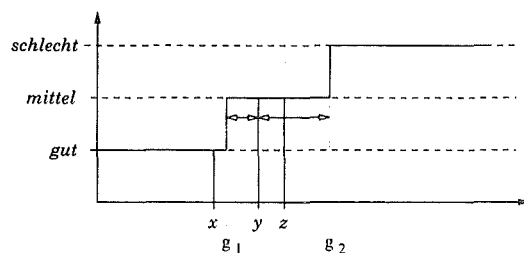
Im ersten Abschnitt wurde bereits bei der Einführung von Bewertungsmodellen darauf hingewiesen, daß die Grenzen in den Bewertungsfunktionen oft nur schwer zu ziehen sind. Dies legt z.B. eine Verwendung von Fuzzy-Sets nahe. Dennoch muß dabei darauf geachtet werden, daß wenn sich diskrete Bewertungsstrukturen der Kritik aussetzen müssen, wie sich die Grenzen rechtfertigen lassen, es genauso bei der Verwendung von Fuzzy-Sets auf eine sinnvolle Begründung der Zugehörigkeitsfunktionen ankommt. Darüberhinaus ist bereits in Abschnitt 3.3 angesprochen worden, daß Anwender aus der Umweltdomäne stets mit diskreten oder diskretetisierten Werten arbeiten und zusätzlich qualitative Information “versteckt” durch eigene Interpretation durch den Bewertungsbaum “hieven”. Interessanterweise läßt sich dieses Verfahren jedoch auch einfach explizieren: Anstatt, wie hier durch eine Treppenfunktion angedeutet, mit diskreten Wertstufen zu rechnen,



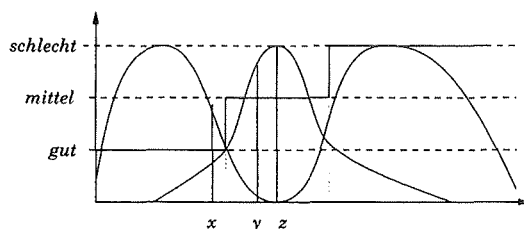
kann eine Intervallarithmetik die Feinheiten über mehrere Bewertungsschritte hinweg mitberücksichtigen — und dabei dem Benutzer dennoch durch Identifikation der Intervalle mit Wertstufennamen⁶ ein Arbeiten auf diskreten Werten zu ermöglichen. EXCEPT kann auf recht einfache Art und Weise mit Intervallinformationen umgehen, in dem zu bestimmten Werten die Distanzen zu den nächsten Wertstufengrenzen expliziert werden (dieses Verfahren

⁶Und hier ergibt sich eine erste Parallele zur Betrachtung von Bewertungen als Äquivalenzklassenbildung!

wurde bereits genutzt, um in EXCEPT-Tabellen verschleierte Information zu explizieren und um Zusatzinformationen wie “(noch) 'gut', aber *nah am Grenzwert zu 'schlecht'*” zu verbalisieren [GGMR94]:



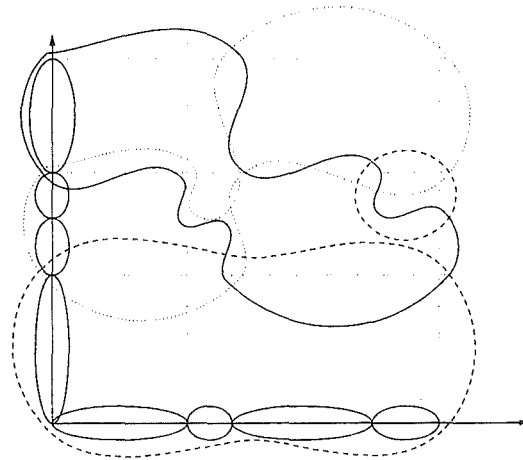
Da $|g_1 - y| \leq |g_2 - y|$ ist y “'mittel'; aber eher 'gut' als 'schlecht'”. Die natürlichsprachlichen Quantoren “eher”, “fast”, “nahe” weisen dann Parallelen zu den sog. *hedges* der Fuzzy-Theorie auf, die die Ausprägungen “gut”, “mittel”, “schlecht” einer linguistischen Variablen modifizieren können⁷. Einmal ganz abgesehen von der tatsächlichen Form der Zugehörigkeitsfunktion (linear, polynomial n -ten Grades) wäre diese Zusatzinformation für ein Bewertungssystem von großer Hilfe:



Natürlich läßt sich über die Form der Funktionen streiten — letztendlich aber entsprechen diese nichts anderem als Wichtungen auf den Differenzen aktueller Meßwerte zu den relevanten Grenzwerten.

Allgemein lassen sich wahrscheinlichkeitsbasierte Ansätze, annotierte Kosten oder ähnliche Verfahren auf den Trick reduzieren, eine explizite Diskretisierung zu vermeiden. Dieses Verfahren entspricht dann bei der Aggregation mehrerer Teilbewertungen einer Mischung aus Abbildung 2 und der “Inversion” der Bewertungsmatrix aus dem Produkt über zwei Kennzahlssysteme:

⁷Die Verwendung von *hedges* hätte zur Folge, daß die Zugehörigkeitsfunktionen abgeflacht bzw. steiler werden können, was einer unterschiedlichen Wichtung der Differenzen entspricht. In Konsequenz bedeutet dies, daß die natürlichsprachlichen Quantoren veränderte Interpretationen erhalten.



Beide Bewertungsmaßstäbe seien hier auf reelle Werte aufgebaut; durch Definition von Intervallen ergeben sich Äquivalenzklassen, die durch die Ovale auf den Achsen K_1 und K_2 angedeutet sind. Wie bereits in 2.1 angesprochen, definiert eine Vereinigung der Schnitte aller Blöcke $K_1 \times K_2$ eine neue Partition, die der Aggregation der Teilbewertungen K_1 und K_2 entspricht. Dabei ist jedoch darauf zu achten, daß auch die Namen der Blöcke in $K_1 \times K_2$ wiederum mit (diskreten) Namen für Bewertungsstufen versehen werden; zusammen mit einer Ordnung auf diesen Stufen. Im obigen Beispiel sind vier Blöcke dargestellt, auf denen wir (in Anlehnung an Fußnote 4) eine Ordnung

$$B_1 \preceq B_2 \preceq B_3 \preceq B_4$$

definieren. Diese Ordnung ist willkürlich und birgt somit ähnliche Probleme wie lückenhafte Kennzahl-Aggregationen: Zwar scheint nun die Metrik auf $K_1 \times K_2$ unproblematisch; liegt jedoch ein $K_1 \cdot K_2(x)$ am Rand von $[x]_{\equiv K_1 \times K_2}$, so muß der nächste Punkt nicht zwangsläufig in einer nach der Ordnungsrelation \preceq definierten benachbarten Klasse liegen.

Man kann sich jedoch recht einfach aus diesem Problem herauswinden, indem man den Merkmalsraum um die Dimension des Wertstufennamens erweitert:

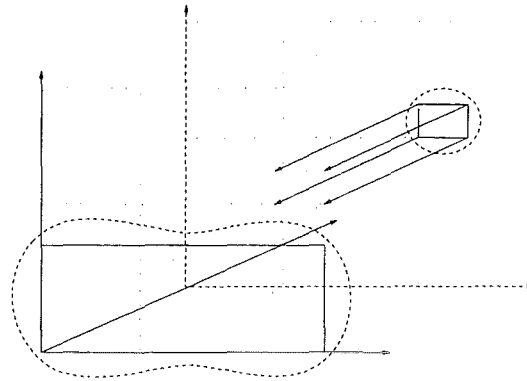
$$f : K_1 \times K_2 \rightarrow K_1 \times K_2 \times \mathbb{N}$$

Die dritte Stelle ergibt sich aus einer Abbildung $f_b : B \rightarrow \mathbb{N}$ der Wertstufennamen in die natürliche Zahlen, so daß \preceq durch \leq interpretiert werden kann. Es können sogar die Differenzen der $f_b(x)$ herangezogen werden, um die Ordnung der B_i in den euklidischen Abstand der Punkte in $K_1 \times K_2 \times \mathbb{N}$ zu integrieren:

$$f_b(x) = \begin{cases} 0 & , \text{wenn } x = \min(\langle B, \preceq \rangle) \\ m + d + 1, & \text{wenn } \begin{cases} f_b(y) = m \text{ wobei } x \text{ die zu } y \text{ nächstgrößere Klasse ist} \\ d = \max(\{\delta(p_1, p_2) | p_i \in x\} \cup \{\delta(q_1, q_2) | q_i \in y\}) \end{cases} \end{cases}$$

Mit anderen Worten werden die Blöcke nach \preceq entlang der \mathbb{N} -Achse um den kleinsten Betrag voneinander getrennt, der größer ist als die euklidischen Abstände aller Punkte innerhalb

der beiden Blöcke. Die folgende Graphik veranschaulicht dieses Verfahren (dabei sind der Übersichtlichkeit halber nur zwei Blöcke eingetragen):



Dieses Verfahren ist natürlich noch nicht vollständig ausgereift, denn auch auf diese Weise ist auf den $K_1 \times K_2 \times \mathbb{N}$ noch keine hinreichend genaue Metrik definiert; eine weitere Untersuchung würde jedoch den Rahmen des Papiers sprengen.

In diesem Abschnitt haben wir aufgezeigt, daß die Verbindung diskreter Bewertungsmethoden mit numerischen Ansätzen äußerst vielversprechend erscheint. Insbesondere die Tatsache, daß die internen Bewertungsverfahren auch auf wahrscheinlichkeitsbasierten Ansätzen wie z.B. Bayes'schen Verfahren aufbauen können, und die Ergebnisse erst im letzten Schritt diskretisiert werden, erlaubt nicht nur eine genauere Aussage, sondern auch einen reicheren Repräsentationsformalismus mit mächtigeren Methoden, der den komplexen Problemen heterogener Bewertungen eher gewachsen zu sein scheint als rein numerische oder diskrete Methoden.

Es werden damit nicht nur Aussagen der Form "Der Produktionsplan p ist **schlechter** als b " und "Der Produktionsplan p ist bzgl. der Methode m als **gut** einzustufen, während b als **schlecht** mit Tendenz zu **inakzeptabel** zu bewerten ist." möglich, sondern sogar genauere Erklärungen: "Plan b ist zu 70% als **schlecht** einzustufen, da das Teilbewertungsanliegen t nahe am Grenzwert zu x liegt und"

4.3 Knowledge Discovery

Im Gegensatz zu den Ansätzen, die in den letzten beiden Abschnitten diskutiert worden sind, werden wir nun ein paar Gedanken vorstellen, die von einer strengen Diskretisierung der Bewertungsgegenstände und der Wertaussagen ausgeht. Insbesondere werden wir dabei den funktionalen Charakter vernachlässigen und uns dem relationalen Modell zuwenden.

Eine ganz andere Herangehensweise als mühevoller Definition von Bewertungsmodellen ist, Bewertungsmodelle oder Teile davon zu erlernen oder schrittweise (halb-) automatisch zu verfeinern. Mit Methoden des maschinellen Lernens kann auf diesem Gebiet einiges geleistet werden: Gegeben eine Menge von Beispielsbewertungen kann die Relevanz einzelner Indikatoren auf das Gesamtergebnis expliziert werden. Darüberhinaus können für eine Menge

von Teilbewertungen neue Aggregationen “erfunden” werden, die sich an der Beispielmenge belegen lassen und noch eine Interpretation durch den Experten erwarten. So kann zum Beispiel der Einfluß von Personen-, Material- und Betriebskosten zu einem Bewertungsgegenstand *Gesamtkosten* zusammengefaßt werden. Insbesondere die Verwendung dieser Mechanismen im Verbund mit der Grobmengentheorie erscheint sehr vielversprechend: Ohne explizite Wahrscheinlichkeiten oder Zugehörigkeitsfunktionen zu postulieren, kann hier eventuell Information über die unsicheren oder unklaren Bewertungsmechanismen aus Beispielen extrahiert werden.

Aus der Grobmengentheorie kann man den Begriff der *Redukte* verwenden, um redundante Indikatoren oder Teilbewertungen ausfindig zu machen oder sogar neue Bewertungsfunktionen zu erlernen: Werden zwei Evidenzen gleich bewertet, so bedeutet das, daß sie in derselben Äquivalenzklasse liegen, die durch die Bewertungsrelationen definiert werden (s. Abbildung 3). In Termini der Grobmengentheorie nennt man solche Evidenzen *ununterscheidbar* (‘indiscernable’) bezüglich einer Menge F von Features (Indikatoren) f , die die Evidenzen beschreiben:

$$\text{ind}_F = \{ \langle x, y \rangle \in \mathcal{B}^2 \mid \forall f \in F : f(x) = f(y) \}$$

Induzieren zwei verschiedene Mengen von Indikatoren oder Teilbewertungen F_1 und F_2 dieselbe Partition auf dem Evidenzenraum, so ist das darin kodierte Wissen äquivalent:

$$\mathcal{B}/_{F_1} = \mathcal{B}/_{F_2} \stackrel{\text{Def}}{\iff} F_1 \simeq F_2$$

Dies ist in Abbildung 8 dargestellt. Wenn nun die Präsenz oder das Fehlen eines Attributes $f \in F$ die Partition nicht verändert, nennt man f *überflüssig*; andernfalls ist f *unverzichtbar*:

$$\text{ind}_F = \text{ind}_{F-\{f\}} \quad \text{was bedeutet, daß} \quad \mathcal{B}/_F = \mathcal{B}/_{F-\{f\}}$$

Kann man nun eine minimale Menge von Attributen $F' \subset F$ durch Streichung von überflüssigen Features finden ($\text{ind}_F = \text{ind}_{F'}$), so nennt man F' ein *Redukt*. Da Redukte nicht eindeutig sein müssen, bezeichnet man mit

$$\text{red}(F) = \{ F' \subset F \mid F' \text{ is kleinste Teilmenge, so daß } \mathcal{B}/_F = \mathcal{B}/_{F'} \}$$

die Menge aller Redukte von F . Durch Vereinigung aller möglichen Redukte erhält man den eindeutig bestimmten *Kern* von F .

Was bedeutet dies in der Domäne Umweltbewertungen? Sei \mathcal{B} die Menge der zu bewertenden Produktionspläne. Indikatoren seien u.a. der Anteil an Restöl in den Metallspanabfällen, die Menge an im Abwasser gelösten SO_2 und die Menge an NO_x in der Abluft. Lassen sich nun der Einfluß von NO_x auf das Bewertungsergebnisse durch den Altölanteil und den SO_2 -Gehalt erklären, so kann dies auf verschiedene Sachzusammenhänge hindeuten:

1. Das Feature NO_x induziert z.B. die selbe Partition wie SO_2 . Dann sind $\{\text{NO}_x\}$ und $\{\text{SO}_2\}$ äquivalent.

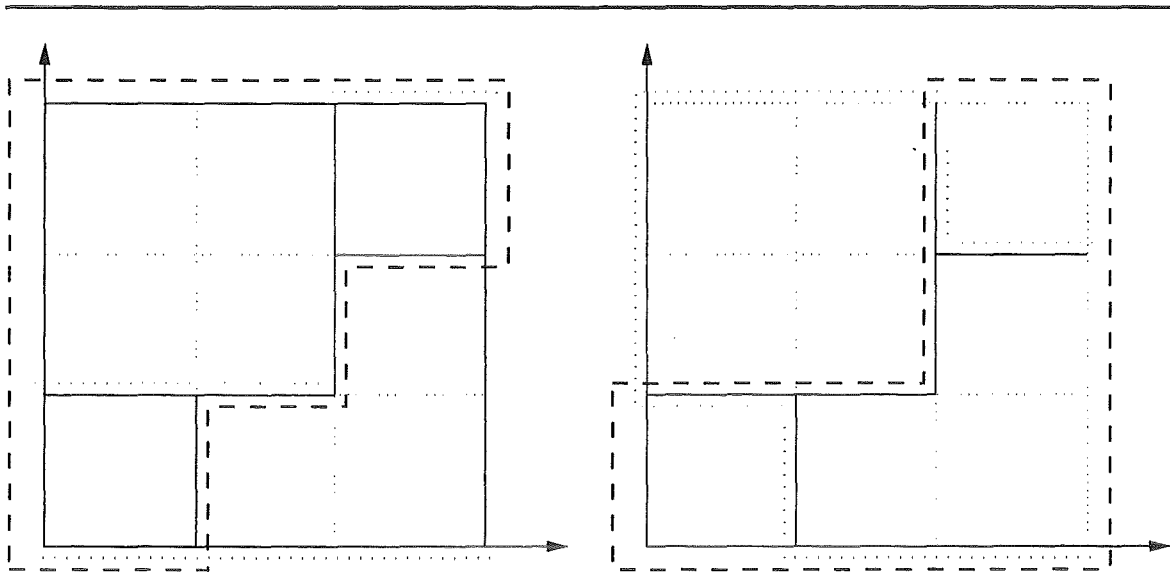


Abbildung 8: Zwei äquivalente Bewertungsmodelle

Dies wäre ein Argument dafür, einen der beiden Indikatoren zugunsten der einfacheren Berechenbarkeit des Bewertungsergebnisses zu streichen.

2. Interessanter ist der Fall, daß die drei Features für sich allein genommen paarweise nicht äquivalent sind.

Dann liegt der Schluß nahe, daß der Wert von NO_x kausal durch eine Aussage über SO_2 und den Altölanteil erklärbar ist.

Auch wenn dieses Beispiel nur bedingt den sinnvollen Einsatz erklären kann, sei an einem anderen Beispiel die Mächtigkeit dieses einfachen Verfahrens aufgezeigt:

Dazu sei daran erinnert, daß die Struktur des übergeordneten Bewertungsbaumes in diesem Anstz von keiner Relevanz ist; was allein interessant ist, sind alle möglichen Klassifikationen von Evidenzen anhand der vorhandenen Features und deren Werten. Nun kann in einem Bewertungsmodell zur Rentabilitätsprüfung von Arbeitsprozessen im Teilbewertungsbereich "Maschinen" der Indikator "Anschaffungspreis/Fertigungsstück" ausgewertet werden, während im Teilbereich "Personal" die Personalkosten und im Teilbereich "Betriebskosten" die laufenden Kosten ausgewertet werden. Eine Grobmengenanalyse kann dann feststellen, daß jeweils gleiche Kosten in diesen Teilbereichen gleichen Einfluß auf das Gesamtergebnis der Bewertung haben. Damit kann dann dem Wissensingenieur der Vorschlag unterbreitet werden, ein neues Teilbewertungsmodul zu erstellen, das die Indikatoren Anschaffungspreis, Personal- und Betriebskosten subsumiert. Selbst die Mächtigkeit der Wertstufenmenge dieses

Moduls und die Bewertungsfunktion stehen bereits fest, da die durch diese drei Features induzierten Partitionen berechnet werden können. Dem Wissensingenieur bleibt nun noch die Interpretation des neuen Moduls überlassen — in diesem Falle handelt es sich einfach um “Gesamtkosten”.

Wir haben im letzten Teilabschnitt nun einen allen anderen Verfahren verschiedenen Ansatz vorgestellt. Die hierin aufgezeigten Möglichkeiten sollten insbesondere motivieren, nicht ganz auf diskretwertige Bewertungsrelationen zu verzichten; da insbesondere aus ihnen sehr einfach und fundiert Hypothesen zu Verbesserungsvorschlägen bestehender Bewertungsmodelle erzeugt werden können.

5 Ausblick

Das Problem der Umweltbewertung von Produktionsplänen ist ein hervorragendes Beispiel, an dem die gesamte Problematik von Bewertungen im allgemeinen deutlich wird. Dieser Artikel hat die wichtigsten Probleme gebündelt dargestellt und einige Lösungsansätze zur Diskussion gestellt.

Insbesondere ist deutlich geworden, daß keines der vorgestellten Verfahren allein eine Lösung der Probleme bieten kann, sondern daß allein eine hybride Bewertungstechnik mächtig genug sein kann, um in kleinen und wohldefinierten Weltausschnitten rechtfertigbare Bewertungen automatisch zu generieren.

Auf diesem Gebiet gibt es viel Arbeit zu leisten; die Integration numerischer und statistischer Verfahren mit diskreten Methoden ist eine Herausforderung, deren Bearbeitung mit Sicherheit positive Auswirkungen auf den Problembereich der heterogenen Bewertungen haben wird.

Literatur

- [Bac94] J. Bacher. *Clusteranalyse*. Oldenbourg, 1994.
- [DGK⁺94] J. Domcke, W. Gieseke, Küsell, N. Lenschow, K. Reincke, C.-R. Rollinger, and T. Wagner. Abschlußbericht des projektes SPOCK. Technical report, Insitut für semantische Informationsverarbeitung an der Universität Osnabrück, 1994.
- [DGK⁺95] J. Domcke, W. Gieseke, Küsell, N. Lenschow, K. Reincke, C.-R. Rollinger, and T. Wagner. Stücklistenverifikation mit SPOCK. In *Proceedings der PuK-95: Planen und Konfigurieren*, 1995.
- [GGMR94] I. Glöckner, A. Grieszl, M. Müller, and M. Ronthaler. TabVer — a case study in table verbalization. In L. Dreschler-Fischer and B. Nebel, editors, *KI-94: Advances in AI*, LNAI. Springer, 1994.

- [Ker94] H. Kernler. *PPS der 3. Generation*. Hüthig, 1994.
- [RMH⁺96] K.C. Ranze, M. Müller, O. Hollmann, J. Peterson, and M. Esser. Relativbewertung von Umweltauswirkungen alternativer Produktionspläne. Technical report, Universität Bremen, FB 3 Informatik, AG-KI, 1996.

**9 Simulationssystem und Datenbank-
Anforderungen an ein Informationssystem für
Umweltprobleme.**

Wittmann, J.

Simulationssystem und Datenbank

Anforderungen an ein Informationssystem für Umweltmodelle

Jochen Wittmann

**Arbeitsgruppe Modellierung/Simulation
Fachbereich Informatik
Universität Rostock**

Ziel dieses Aufsatzes ist es, die Beziehung zwischen Simulationssystem und Datenbanksystem aufzuzeigen und eine Lösungsidee zur sinnvollen Integration der beiden Komponenten vorzuschlagen.

Zu diesem Zweck werden zunächst die Anforderungen während der Arbeitsschritte Modellerstellung und Experimentieren aufgezeigt. Eine Verallgemeinerung dieser Anforderungen zeigt, daß die geforderte Funktionalität in weiten Bereichen von Datenbanksystemen bereits angeboten wird und sich zur Lösung dieser Probleme durchaus eignet. Eine entsprechende Implementierungsidee, die zu einem integrierten Informationssystem aus Datenbank- und Simulationssystem führt, wird aufgezeigt. Insbesondere für komplexe Anwendungen, wie sie im Bereich der Umweltmodelle auftreten, erweist sich dieser Ansatz als geeignet.

Ein Ausblick unterstreicht die Realisierbarkeit und Nützlichkeit des Konzeptes auch in den Bereichen Datenabhängigkeiten im Modell sowie für die Experimentausführung. Den Abschluß bildet eine kritische Diskussion der vorgeschlagenen Lösungsidee.

1.0 Die Problemstellung

Der Funktionsumfang von Simulationssystemen hat in den letzten Jahren in beträchtlichem Maße zugenommen [Schm92]. Dies liegt einmal an der Möglichkeit, modular-hierarchische Modelle aufzubauen, andererseits aber auch an der Ausweitung der Funktionalität in der Experimentierumgebung. Die zunehmend komplexeren Modelle verlangen nun nach einer Verwaltung der Modellhierarchie, die Vielzahl der während des Experimentierens erzeugten Daten nach einer übersichtlichen und effizienten Datenverwaltung.

Zur Lösung dieser Aufgaben erweitert man in der Regel das Simulationssystem um die neuen Funktionalitäten, was zu sehr umfangreichen Softwaresystemen führt und damit abgesehen von der mangelnden Benutzerfreundlichkeit schon aus Gründen der Softwaretechnologie nicht als die ideale Lösung erscheint. Als Alternative bieten sich Datenbanksysteme gerade zur Verwaltung größerer Datenmengen mit vielfältigen Beziehungen an. Sie verfügen über viele der geforderten Fähigkeiten, haben sich jedoch bislang nicht zur Lösung der Anforderungen der Simulation durchgesetzt.

In dieser Situation sollen die Anforderungen von seiten der Simulationstechnik erneut definiert werden und als Ergebnis ein Informationssystem vorgeschlagen werden, das sowohl das Kriterium der Benutzerfreundlichkeit erfüllt als auch softwaretechnologischen Gesichtspunkten genügt.

2.0 Anforderungen an ein Simulationssystem

2.1 Anforderungen während der Modellerstellung

Zunächst sollen nun die Anforderungen an ein Softwaresystem zur Simulation genannt werden, die im Arbeitsschritt der Modellerstellung auftreten. Die Aufzählung orientiert sich nach den verwendeten Objekten und beginnt mit der kleinsten im Modell verwendeten Einheit.

2.1.1 Modellgrößen:

Gerade auf dieser untersten Ebene sind Anforderungen zu nennen, die in bisherigen Systemen meist vernachlässigt werden. Neben dem Namen der Modellgrößen und ihrem Typ (integer oder real) sind nämlich weitere Angaben von entscheidender Bedeutung, die gerade bei komplexen Modellen, wie sie im Bereich der Umwelthanwendungen üblich sind, auftreten [Benz95]. Es sollten zusätzlich angegeben und verwaltet werden:

- **Art der Berechnung:** Hier sollte neben dem Typ zusätzlich angegeben werden, ob sich der Wert der Größe über eine Differentialgleichung, eine Differenzgleichung, zeitdiskrete Ereignisse oder eine algebraische Gleichung herleitet, ob es sich um einen (veränderbaren) Parameter handelt oder ob eine Modellkonstante vorliegt.
- **physikalische Maßeinheiten:** Sie gehören eigentlich als fester Bestandteil zu jeder eingeführten Modellgröße und sind für Konsistenzprüfungen auf allen Ebenen der Modellhierarchie unerlässlich. In den üblichen Systemen können sie meist nur als Kommentar angegeben werden. Eine Prüfung der Modellgleichungen auf Konsistenz der Maßeinheiten oder eine automatische Konvertierung kompatibler Einheiten ist hingegen nur in sehr wenigen Systemen möglich.
- **Kommentare/Bemerkungen:** In der Regel ist der Modellentwickler angehalten, alles weiterhin Wissenswerte über die Modellgrößen auf freiwilliger Basis in einem Kommentarfeld abzulegen. Diese Zusatzinformationen sind einerseits nicht obligatorisch, andererseits kann auf sie später nur noch durch ein Lesen des Quelltextes zugegriffen werden. In die Verwaltungsstrukturen des Simulationssystems sind sie nicht integriert. Besonders für Umweltmodelle können aber gerade diese Angaben von entscheidender Bedeutung sein: Man denke z.B. an die exakte Angabe der Meßmethode, mit der ein Parameterwert bestimmt worden ist, oder einfach nur eine kurze textuelle Beschreibung, die über den Bezeichner hinausgeht und präziser angibt, welche Elemente der Realität mit dieser Größe abgebildet werden sollen.

2.1.2 Modellgleichungen/Ereignisse:

Für Modellgleichungen und Ereignisse erscheinen ähnliche Angaben sinnvoll:

- **Begründung für die Wahl des Ansatzes:** Analog zur Kommentierung der Modellgrößen erscheint auch hier eine Begründung für die Wahl des Ansatzes sinnvoll. Nur so wird eine Bewertung und Validierung der Ergebnisse ermöglicht.
- **Geltungsbereich:** Hierunter ist dasjenige Intervall zu verstehen, für das die angegebene Gleichung gültig ist. Beispielsweise gelten die Lotka-Volterra-Gleichungen zur Populationsdynamik nur für hinreichend große Populationen, für kleinere Fallzahlen müßten zum Beispiel individuenorientierte Ansätze gewählt werden. Einfachstes Beispiel, das in Einführungskursen immer wieder zu Erstaunen führt, ist die Frage, ob sich eine Population mit weniger als einem Individuum tatsächlich wieder erholen kann, wie es das einfache Räuber-Beute-Modell vermittelt.

2.1.3 Modellkomponenten:

Alle vorher genannten Informationen beziehen sich auf das „Innere“ einer Modellkomponente. Auf der Komponentenebene sind nun lediglich die **Schnittstelleninformationen** von Bedeutung.

2.1.4 Modellhierarchie:

Die Komponenten können zu hierarchischen Modellen zusammengefügt werden, was weitere Anforderungen an die Modellverwaltung stellt.

Zusammenfassend läßt sich an dieser Stelle feststellen, daß sämtliche Informationen mit mehr oder weniger Aufwand in bestehenden Systemen zwar abgelegt werden können, daß die Suche nach bestimmten Einträgen allerdings sehr umständlich ist. In der Regel muß die Modell- bzw. Experimentstruktur vom Benutzer durch abwechselnde Ausführung von Anwähle- und Informiere-Kommandos abgesucht werden.

Fragen wie „Welches Modell der Modellbank beinhaltet die Modellgröße ph-Wert?“ oder „Welche Gleichungen und Ereignisse beeinflussen die Modellgröße Füchse?“ lassen sich somit nicht mit vertretbarem Aufwand beantworten. Obwohl gerade die letzte Frage bei der Suche nach bestehenden Modellen sehr hilfreich wäre.

Ein weiteres Anforderungsfeld ist die Frage der Datenkonsistenz. Alle Angaben dienen nämlich nicht nur der Information des Anwenders, sondern sind auch für das System bei der Arbeit mit den Modellen einsetzbar. Nur wenn die Zusatzinformationen vorliegen, sind Konsistenzprüfungen bei Änderungen in Modellkomponenten, bei der Kopplung von Modellen und sogar eine Unterstützung bei der Modellvalidierung möglich. Eine Aufgabe die durchaus automatisch erfolgen könnte, allerdings in der Regel nicht angeboten wird.

Die Gründe liegen wohl in zwei Bereichen: Einmal ist die Implementierung der Konsistenzregeln nicht trivial, andererseits kann es Akzeptanzprobleme bei den Anwendern geben, wenn das System ständig und auch für nur vorübergehend geltende Zwischenzustände die strikte Einhaltung der Datenkonsistenz fordert. Hier ist eine Lösung erforderlich, die auch diesen Randbedingungen gerecht wird.

2.2 Anforderungen in der Experimentierphase

2.2.1 Experimenthierarchie

In der Experimentierumgebung eines Simulationssystems fallen Ergebnisdaten an, die sich baumartig strukturieren lassen. Ein Experiment besteht aus mehreren Simulationsläufen, möglicherweise mit unterschiedlichen Modellstrukturen ausgeführt. Einer dieser Läufe kann wiederum in Laufabschnitte zerlegt sein, an deren Anfangs- und Endpunkten der jeweilige Modellzustand abgespeichert ist, und die Werte der Modellgrößen vorliegen.

Entsprechend der Gliederung des Experiments gestaltet sich in den Systemen, die eine derartige Strukturierung und Variationsmöglichkeit zulassen, auch der Zugriff auf das Datenmaterial. Der Anwender bewegt sich durch die Experimenthierarchie, indem er sämtlichen Objekten Namen gibt, das entsprechende Objekt auswählt und schließlich eine Informiere-Funktion aufruft, die ihm die gewünschte Information extrahiert und anzeigt. Es handelt sich demnach um einen 'navigierenden' Zugriff, der allerdings die Kenntnis der entsprechenden Objektbezeichner voraussetzt. Dadurch verkompliziert sich die Arbeit und der Wunsch nach einer Suchfunktionalität im System wird wach. Wünschenswert wäre beispielsweise eine Anfrage der Form „In welchen Experimenten wurde der Anfangswert der Modellgröße Weidekapazität variiert?“ und als Antwort ein Formular, das zum Beispiel die Werte der Zustandsgrößen für Hasen und Füchse in Abhängigkeit der variierten Größe anzeigt und ein Blättern in sämtlichen im Experimentiersystem gespeicherten Läufen zu diesem Thema erlaubt. Derartige Bedienung ist aus Datenbanksystemen bereits bekannt.

2.2.2 Experimentiermethoden

Der vorherige Abschnitt beschäftigte sich mit der statischen Experimentstruktur. Hier sollen die Änderungen in dieser Struktur behandelt werden. In allgemeinsten Form werden sie durch die Ausführung von Experimentiermethoden ausgelöst. Die Experimentiermethoden lassen sich hierarchisch anordnen. Basierend auf dem Simulations-Laufzeitsystem mit Integrationsverfahren und Ereignisbehandlung lassen sich die Ebenen der Durchführung eines Simulationslaufes, der Parametervariation, der Optimierungsverfahren und schließlich der Szenarioanalysen aufbauen.

Auf den ersten Blick steht, ähnlich wie beim Aufbau der Modellhierarchie, die Schnittstellenproblematik im Vordergrund. Für jede Methode ist die Einhaltung der Input- bzw. Output-Formate zu beachten, die einerseits die zu bearbeitenden Daten selbst betrifft, andererseits aber auch die Parametrisierung der Methoden umfaßt.

Da meist nicht nur eine einzige Methode aufgerufen wird, um ein Ergebnis zu erhalten, sondern mehrere Methoden in Form einer Hintereinanderausführung, eine Methodenkette, notwendig sind, handelt es sich auch hier um eine Aufgabe, die automatisierbar erscheint, wenn dem System nur genügend Zusatzinformationen über Methodenschnittstelle und -parameter verfügbar sind. Wäre diese Voraussetzung erfüllt, könnte die Methodenfolge zur Sensitivitätsanalyse des Räuber/Beute-Modells bezüglich der Geburtsrate der Beute automatisch generiert und ausgeführt werden. Der Anwender würde lediglich die Methode Sensitivitätsanalyse anstoßen und als Ergebnis ein Formular der oben beschriebenen Form erhalten, in dem er sich durch die einzelnen Endzustände blättern und sich über die Auswirkungen der Änderung des Parameterwertes informieren kann.

Neben der automatischen Generierung von Experimenten wäre auch eine Unterstützung des interaktiven Experimentierens möglich. Sind die Methoden nämlich in der oben beschriebenen Ausführlichkeit dokumentiert und ist der Benutzer bereit, seine Eingangsdaten ähnlich genau zu spezifizieren, so erscheint es möglich, die Auswahl der korrekten Methode von seiten des Systems wirksam zu unterstützen. Insbesondere bei der Vielzahl von statistischen Funktionen und graphischen Darstellungsmöglichkeiten erscheint diese Vorgehensweise für den Anwender vorteilhaft.

2.3 Verallgemeinerung der Anforderungen

Betrachtet man die Anforderungsliste an ein Simulationssystem, so stellt man zwischen dem Bereich der Modellerstellung und dem Bereich der Experimentausführung deutliche Parallelen fest: Die Komplexität der Aufgabenstellung erfordert in beiden Fällen eine Zerlegung des Lösungsweges in mehrere Teilschritte, woraus sich die Schnittstellenproblematik zwangsläufig ergibt. Die Module sind auf jeder der angesprochenen Ebenen relativ autark, es bestehen jedoch komplexe Abhängigkeitsstrukturen zwischen den einzelnen Objekten.

Beispiele:

- autarke Modellkomponenten zu einer Modellhierarchie zusammenschaltet
- unabhängige Simulationsläufe in einer verzweigten Experimentstruktur zusammengefaßt, um ein übergeordnetes Experimentziel zu erfüllen
- unabhängige Methoden zu einer Verarbeitungskette verbunden

In allen Fällen wird ein vermehrter Verwaltungsaufwand erforderlich, der vom System die Verwaltung von Zusatzinformationen verlangt (Arten von Modellgrößen zur korrekten Kopplung, Datenabhängigkeiten in der Experimentstruktur, Schnittstellenspezifikation der Experimentiermethoden), um die Konsistenz der gespeicherten Information zu gewährleisten. Ist diese Information jedoch einmal verfügbar, so ist bereits angedeutet worden, daß sich neue Möglichkeiten der Benutzerunterstützung ableiten lassen, die die Automatisierung bisher ausschließlich vom Benutzer gesteuerter Vorgänge umfaßt (Methodenwahl, Experimentgenerierung, Modellkopplung). Im folgenden sollen nun die prinzipiellen Alternativen zur Lösung der Konsistenzproblematik aufgezeigt und bewertet werden.

3.0 Lösungsalternativen

3.1 isolierte Module mit loser Kopplung

Die erste Alternative, sowohl die beschriebenen Anforderungen zu erfüllen als auch ein lauffähiges Gesamtsystem zu entwickeln, besteht darin, jede Funktion in einem isolierten Modul zu halten und diese Module nur lose zu koppeln. Man könnte diese Lösung als eine Funktions- bzw. Programmbibliothek für Simulationsanwendungen bezeichnen (siehe auch [Brei91]).

Dieser Ansatz besticht durch seine Modularität und die Tatsache, daß von der Seite des Simulationssystems nur sehr wenige zentrale Eingriffe in den Ablauf notwendig sind. Im wesentlichen ist für den Aufruf des entsprechenden Moduls zu sorgen und diesem die Kontrolle zu übergeben.

Den Konsistenzanforderungen ist dieses Modell jedoch nicht gewachsen. Jedes Modul hat nämlich bei seinem Aufruf sämtliche Vorbedingungen selbst und ohne Kenntnis der Vorgeschichte der Daten zu überprüfen. Dies führt zu einem erheblichen Mehraufwand an Programmcode. Abgesehen vom Aufwand bestehen allerdings auch unter theoretischen Gesichtspunkten Zweifel, ob dieser Lösungsweg eingeschlagen werden kann. Es wäre hier zu untersuchen, ob die übergreifenden Konsistenzfragen lokal, ohne eine zentrale Instanz, entscheidbar sind.

Darüber hinaus ist zu bemerken, daß dieser Ansatz weder über die geforderte Suchfunktionalität verfügt, noch Hinweise auf eine Bedienoberfläche bietet. Im Extremfall arbeitet jedes Modul mit einer eigenen Oberfläche, der Anwender hat folglich einen sehr hohen Einarbeitungsaufwand und ist weiterhin auf die manuelle Informationssuche verwiesen.

3.2 universelles, integriertes System

Im Punkt Bedienoberfläche bietet die zweite Alternative unbestrittene Vorteile. Sämtliche Funktionalität ist in ein komplexes Softwaresystem eingebettet, spezialisiert auf die Anforderungen der Simulation. Diese Alternative ist in zwei Varianten bekannt:

3.2.1 auf der Basis eines Simulationssystems

Hier bildet der Simulator das zentrale Modul, es existiert eine gemeinsame Modellbeschreibungssprache, die verwendeten Methoden sind fest eingebunden, alle Anforderungen werden von der zentralen Stelle ausgeführt. Entsprechend ergibt sich auch die Möglichkeit, sämtliche Informationen über Modelle, Experimente und Ergebnisdaten zentral zu sammeln und zu verwalten. Es ist dies die konventionelle Architektur eines Simulationssystems.

Über die Verwaltung und den Zugriff hinaus ist es in dieser Architektur selbstverständlich leicht möglich, die Konsistenzbedingungen zu testen. Die Suchfunktionalität müßte jedoch vollständig neu implementiert werden, wobei allerdings zusätzliche Strukturen notwendig werden, die einen effektiven Zugriff ermöglichen.

3.2.2 auf der Basis eines Datenbanksystems

Bei dieser Variante bildet ein Datenbanksystem das zentrale Modul, der Simulationsteil tritt in den Hintergrund. Die Suchfunktionalität wird hier erfüllt, auch die Verwaltungskomponente läßt sich relativ einfach realisieren. Schwierigkeiten treten bei der Einbindung von Methoden auf, die über eine DB-Anfrage hinausgehen. Gerade diese Methoden (Integrationsverfahren, Simulationslauf, ...) werden jedoch für die Anwendung in der Simulation benötigt.

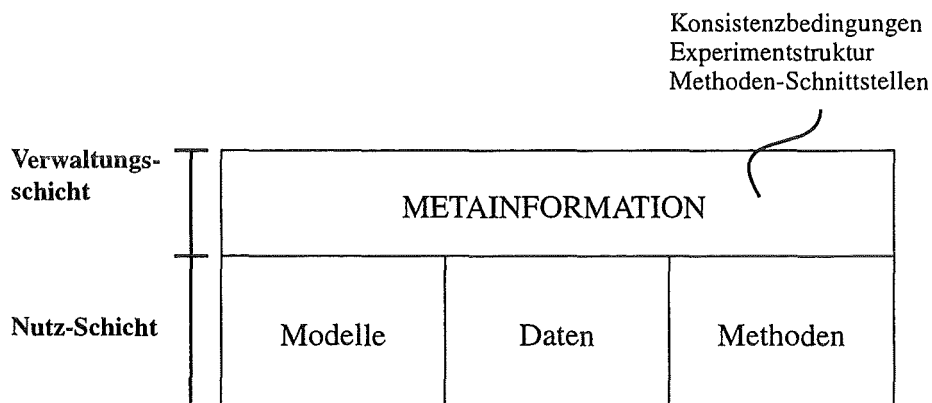
Eine weiteren Problemkreis bildet die Speicherung von großen, gleichförmigen, nur wenig strukturierten Daten wie zum Beispiel Zeitreihen, die den Hauptteil der Ergebnisdaten eines Simulationslaufes

ausmachen. In beiden Fällen könnte die Verwendung von objektorientierten DB-Ansätzen Abhilfe schaffen. Dahingehende Pilotprojekte sind allerdings nicht bekannt.

3.3 Zwei-Schichten-Modell

Ein wesentlicher Nachteil der universellen Systeme ist jedoch die Systemgröße überhaupt. Einmal unter dem Gesichtspunkt von Systempflege- und Wartung, andererseits aber auch bezüglich der Übersicht für den Anwender. Darüber hinaus ist es erforderlich, sämtliche Module fest mit dem System zu verbinden, was zu einer geringen Flexibilität bezüglich Änderungen führt. Aus diesen Gründen soll hier ein Zwei-Schichten-Modell vorgestellt werden, das dem Problem auf andere Weise begegnet.

Die Grundidee ist die folgende: Alle Informationen, die zur Verwaltung notwendig sind oder bei der Kontrolle der Konsistenzbedingungen benötigt werden, sind von den eigentlichen Nutzdaten zu trennen und zentral zu halten. In diesen sogenannten „Metadaten“ stehen daher Modell- und Experimentstruktur, Methoden-Schnittstellen sowie die einzuhaltenden Regeln für die Konsistenz des Datenmaterials. Ob der eigentliche Methodenaufruf nun im universellen Simulationssystem integriert ist und zentral ausgeführt wird, oder ob die Ausführung dort nur angestoßen und kontrolliert wird, die Methoden aber dezentral abgearbeitet werden, läßt dieser Ansatz bewußt offen. So wird eine größtmögliche Modularisierung der Methoden erreicht, ohne auf die zentrale Kontrolle verzichten zu müssen.



Die Vorteile dieser Aufteilung sind die folgenden:

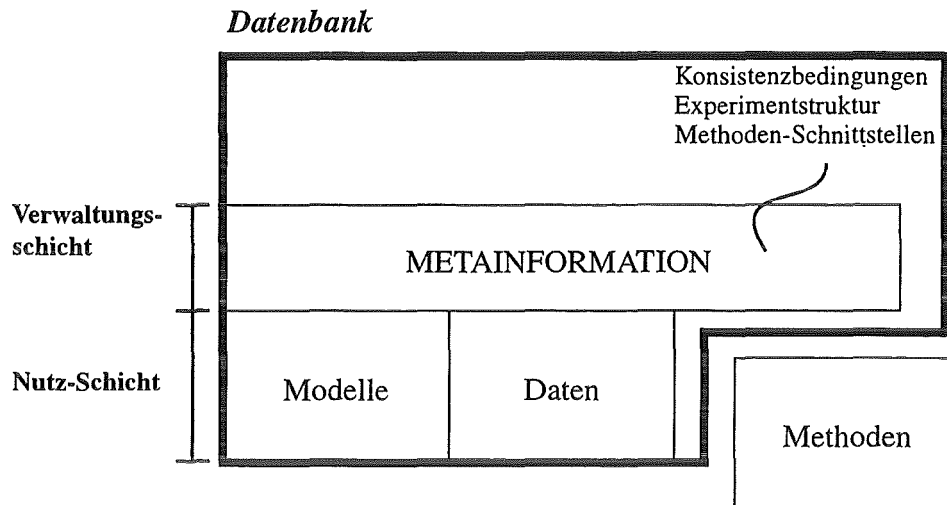
- Verwaltung leicht möglich
- Konsistenzprüfung ausschließlich an Hand der Metainformation
- Suchfunktionalität auf der Metainformation möglich
- Methodeneinbindung sehr allgemein und flexibel

Darüber hinaus ergeben sich mit einer derartigen Systemstruktur neuartige Möglichkeiten der Implementierung, die im folgenden erläutert werden sollen.

4.0 Implementierungsidee

Die Grundidee, die hinter der Aufspaltung in Metainformationen, Modelle, Daten und Methoden steht, kann nun sehr leicht in Beziehung gesetzt werden zur Verwendung von Datenbanktechnologie. Bei näherer Betrachtung können nämlich sämtliche fett gerahmte Komponenten des vorgeschlagenen

Simulationssysteme in einem Datenbanksystem abgelegt und verwaltet werden. Die Vorteile dieser Vorgehensweise sollen im Anschluß an die Abbildung aufgezählt werden.



- **Modellstruktur als Datenmodell:** Untergliedert man, wie es im Anforderungsteil beschrieben ist, die Modellbeschreibung derart fein, um die Dokumentations- und Suchanforderungen erfüllen zu können, so lassen sich diese Informationen in Form von Relationen eines Datenbankschemas realisieren. Zu beachten ist, daß diese Untergliederung bis auf die Ebene der Modellgleichungen und Ereignisse herunterreichen muß und nicht wie gewohnt auf Komponentenebene endet. Ist das Modell jedoch erst einmal in dieser Form abgelegt, so ist als entscheidender Vorteil dieser Vorgehensweise anzumerken, daß keinerlei neue Funktionalität zum Zugriff oder zur Verwaltung implementiert werden muß, sondern ausschließlich auf DB-Funktionalität zurückgegriffen werden kann. Insbesondere die in herkömmlichen Systemen fehlende Suchfunktion ist auf diese Weise eingebettet.
- **Experimentstruktur als Datenmodell:** Analog zum Modell kann auch die verzweigte Experimentstruktur in ein Datenmodell überführt werden, das die Beziehungen zwischen Simulationsläufen, Anfangs- und Endzuständen sowie Ergebnisdaten repräsentiert. Bemerkenswert ist bei diesem Ansatz, daß Modell- und Experimentstruktur in vollkommen gleicher Weise abgelegt werden und daher auch einheitlich abgefragt und zugegriffen werden können.
- **Konsistenzforderungen als Datenabhängigkeiten:** Den größten Nutzen zeigt die vorgeschlagene Lösung jedoch bezüglich der Einhaltung der Konsistenzbedingungen. Gerade weil Modell und Experiment einheitlich in einem Datenmodell gespeichert sind, wird es möglich, die Konsistenzbedingungen in Form von Datenabhängigkeiten des Datenmodells zu formulieren und ihre Überwachung damit dem Datenbankmanagementsystem zu übertragen. Dieses prüft bei jeder Änderung die gegebenen Bedingungen und läßt etwaige Verletzungen nicht zu. Die beschriebene Funktionalität der Datenbank kann ohne jeglichen Programmieraufwand übernommen werden und bietet einen Komfort, der in bestehenden Simulationssystemen nicht oder nur sehr eingeschränkt angeboten wird.
- **Zugriff über SQL-artige Anfragesprache:** Auch die Implementierung des Datenzugriffs wird selbstverständlich von der Datenbanktechnologie unterstützt. Auf dieser Ebene kann auf bestehende Anfragesprachen zurückgegriffen werden, die das Datenmaterial erschließen. Es ist auch hier kein Programmieraufwand erforderlich, geübtere Anwender werden sogar ohne weitere Benutzerschnittstelle allein auf der SQL-Ebene mit dem System arbeiten können. Auf diesen Punkt soll im Ausblick noch näher eingegangen werden.
- **Unterstützung bei der Erzeugung von Benutzerschnittstellen:** Da alle Informationen einheitlich in einer Datenbank abgelegt sind, kann zur Erzeugung von „höheren“ Bedienoberflächen auf die dort angebotenen Möglichkeiten zurückgegriffen werden. Ohne im einzelnen näher zu erläutern seien hier nur genannt: Formulare, Berichte, WWW-Anschluß, ... Detailliertere Beschreibungen finden sich in den Handbüchern der entsprechenden Systeme.

- **Methodenabarbeitung mit Transaktionskonzept und Recovery-Mechanismen:** Obwohl die Simulationsmethoden selbst aus dem Kernbereich der Datenbank herausfallen, kann die Datenbanktechnologie dennoch für deren Aufruf von Nutzen sein. Betrachtet man nämlich die Ausführung einer Methode (und die Durchführung eines Simulationslaufs ist ja auch nichts anderes als die Ausführung einer Methode), so kann diese Ausführung durch das Transaktionskonzept der Datenbank unterstützt werden, eine Möglichkeit, die insbesondere für den Mehrbenutzerbetrieb im Simulationssystem oder aber bei einer verteilten oder parallelen Ausführung der Methoden von größtem Interesse sein wird. Sämtliche Koordinationsaufgaben und die Fehlerbehandlung bleibt dem DB-System überlassen, das stets einen konsistenten Zustand des Systems garantiert. Gegebenenfalls wird es geeignete Recovery-Mechanismen aktivieren.

5.0 Konsequenzen

5.1 Datenabhängigkeiten

Es soll hier nur in einer unvollständigen Aufzählung angedeutet sein, in welche Bereiche sich die neuartige Systemstruktur auswirken kann. Grundlage ist stets die einheitliche Speicherung von Modell und Experimentdaten, die sich für vielerlei Analysen anbietet und in herkömmlichen Systemen nie in der hier vorgeschlagenen Vollständigkeit vorlag:

- **Modellhierarchie:** Die Beziehungen in der Modellhierarchie, die zur Abarbeitung beachtet werden müssen, lassen sich ohne weiteres durch eine einfache Anfrage bestimmen. Wegen der Einfachheit kann man daran denken, diesen Vorteil auch zur Laufzeit bei der Abarbeitung von komplexen, gekoppelten Modellen zu verwenden.
- **Parallelisierung von Modellläufen:** Da auch die Experimentstruktur abgebildet wird, ist es denkbar, auf dieser Struktur eine automatische Einteilung in parallel abzuarbeitende Abschnitte vorzunehmen. Sämtliche Beziehungen sind im voraus bekannt und in der Datenbank eingetragen. Lediglich ein Analysator, der auf die Anwendung „Simulation“ zugeschnitten ist, ist zusätzlich zu implementieren.
- **Abhängigkeitsgraph für Modellgleichungen:** Die bedeutsamsten Vorteile werden sich allerdings aus der Tatsache ergeben, daß auch die Modellgrößen und deren Beziehungen untereinander in strukturierter Form gespeichert sind. Aus diesen Informationen lassen sich zum Beispiel auf einfachste Weise Zyklen bestimmen oder eine optimale Berechnungsreihenfolge über einen Abhängigkeitsgraphen finden. Alle diese Analysen sind auf der gegebenen Datenstruktur möglich, sie benötigen keinen zusätzlichen Aufwand.

5.2 Anfragesprache

Die wichtigsten Auswirkungen machen sich jedoch bei der eigentlichen Arbeit mit dem System bemerkbar, da sie die Verwendung der Anfragesprache betreffen. Die Arbeit mit einem herkömmlichen Simulationssystem gestaltet sich in der Regel in zwei Phasen [Witt93]:

Phase 1: Information erzeugen, indem ein oder mehrere Simulationsläufe oder andere Methoden ausgeführt werden, die die gewünschten Daten als Ergebnis liefern. Diese Phase besteht in der Regel aus einem oder mehreren Kommandos des Simulationssystems, die der Anwender in der korrekten Reihenfolge aufrufen muß.

Phase 2: Information abfragen. Nach dem Erzeugen der Information hat der Anwender weitere Kommandos abzuschicken, die aus den Endzuständen der Simulationsläufe, den Zeitreihen und den anderen Ergebnisdaten die eigentlich interessierende Information extrahieren und anzeigen.

Diese zweiphasige Arbeitsweise kann mit der beschriebenen Systemarchitektur nun grundlegend verändert werden. Verfolgt man die Idee einer SQL-artigen Anfragesprache weiter, so kommt man zum folgenden Arbeitsablauf:

1. Anfrage stellen: Der Anwender stellt eine Anfrage an das System, die sich allerdings nicht nur auf die bereits gespeicherte Information beziehen kann, sondern auch diejenige umfassen darf, die sich durch eine beliebige Methodenfolge erzeugen läßt. Beispielsweise die Werte einer Zustandsgröße im Endzustand für die Anfangsparameter $p_1 \dots p_N$.

2. Suche wird angestoßen: Ganz im Sinn einer Datenbankanfrage versucht das System die Anfrage mit der bereits gespeicherten Information zu beantworten.

3. Erzeugen der fehlenden Information: Kann das System die Anfrage nicht mit seinem bestehenden Dateninhalt beantworten, so veranlaßt es daraufhin selbständig die Generierung und die Ausführung einer geeigneten Methodenfolge, um die fehlenden Informationen in der Experimentstruktur zu erzeugen.

4. Ergebnismenge darstellen: Im letzten Schritt der Anfrage wird die nachgefragte Information schließlich dem Benutzer angezeigt.

Man beachte, daß diese Vorgehensweise nach außen hin nur noch einstufig erscheint, der Anwender also direkt Antworten auf seine Anfragen erhält, ohne sich über die Art der Generierung des zur Beantwortung notwendigen Datenmaterials Gedanken machen zu müssen. Die Regeln, nach denen die Informationen generiert werden, sind ebenfalls in der Datenbank abzulegen. Sie stellen einen Teil der Metainformation dar. Insgesamt tritt diese Arbeitsweise dem Anwender nicht mehr im Sinne eines Simulationssystems gegenüber sondern vielmehr als Informationssystem, in das auch die Simulation zur Beantwortung von Fragen nach zukünftigen Variablenbelegungen integriert ist. Das Informationssystem ist ausschließlich über Anfragen zu bedienen, enthebt den Benutzer von der manuellen Ausführung der Methoden und bringt seine Arbeit damit näher an die eigentlich von ihm zu untersuchende Problemstellung.

6.0 Zusammenfassung/Diskussion

In der Zusammenfassung sind zwei wesentliche Punkte hervorzuheben: Erstens wird in diesem Artikel vorgeschlagen, ein **Datenbanksystem zur einheitlichen Verwaltung von Experimenten und Modellen** zu verwenden. Vorteile sind die einheitliche Speicherung und Zugriffstechnik sowie die Verwendung bereits vorhandener datenbanktechnischer Konzepte, die die Implementierung wesentlich vereinfachen. Die Basis für diese Überlegungen bildeten die Anforderungen 'Suchfunktionalität' und 'Datenkonsistenz', die gerade in Anwendungsbereichen der Simulation mit hohem Komplexitätsgrad von Bedeutung sein dürften.

Zweitens ist die neuartige **Arbeitsweise mit dem vorgeschlagenen Informationssystem** festzuhalten. Der Anwender stellt eine Anfrage, er arbeitet nicht direkt auf einer Modell- bzw. Experimentbank. Auf diese Weise kann er durch die automatische Generierung der notwendigen Experimente von Routinearbeiten entlastet werden und erhält unabhängig von der Kommandoebene des Simulationssystems eine Unterstützung auf der Ebene seines eigentlichen Problems.

Zur Diskussion gestellt werden sollen nun vier mögliche Kritikpunkte, bezüglich derer die Meinung der Anwender in die zukünftigen Überlegungen eingehen sollen:

1. Wie hoch ist die Bereitschaft der Anwender, die Ebene der Metainformation auszufüllen?
2. Wie stark fühlt sich ein Benutzer durch die relativ strenge Anforderung nach Datenkonsistenz in der Arbeit mit dem System eingeschränkt?
3. Wie groß ist die Akzeptanz eines derart umfangreichen Systems?
4. Wie groß ist die Akzeptanz bezüglich der ausschließlichen Arbeit mit einer Anfragesprache?

7.0 Literatur

- [Benz95] **Benz, Joachim:** ECOBAS - Dokumentation mathematischer Beschreibungen ökologischer Prozesse; in: Umweltwissenschaften, Band 4, Eberhard Blottner Verlag, (im Druck)
- [Brei91] **Breitenecker, Felix:** Fortschritte in der Simulationstechnik; in: Tavangarian, D.: Fortschritte in der Simulationstechnik, 7. Symposium in Hagen, Braunschweig, 1991
- [Schm92] **Schmidt, Bernd:** Simulationssysteme der 5. Generation; in: Sydow, A.: Fortschritte in der Simulationstechnik, 8. Symposium in Berlin, Braunschweig, 1993
- [Witt93] **Wittmann, Jochen:** Eine Benutzerschnittstelle für die Durchführung von Simulationsexperimenten, Dissertation am Inst. f. Math. Maschinen und Datenverarbeitung, Universität Erlangen-Nürnberg, 1993



10 Das integrierte Simulationsbanksystem in SAMOS.

Martini, F.

Das integrierte Simulationsbanksystem in SAMOS

Falk Martini
AG Modellierung/Simulation
Fachbereich Informatik
Universität Rostock
fmartini@informatik.uni-rostock.de

1 Motivation

Es existieren zwei wesentliche Gründe, die Rolle des Datenmanagements innerhalb eines modernen Simulationssystems zu überdenken.

Der erste ergibt sich aus den aktuellen Entwicklungstendenzen der Simulationstechnik. Früher hantierte der Anwender mit einer Datei für seine Quelltexte und einer für die Ergebnisse. Deshalb bestanden auch keine Forderungen nach einer ausgefeilten Modell- und Experimentverwaltung. Heutzutage dagegen spielen der Modellaustausch und die Wiederverwendbarkeit von Modellen eine wesentliche Rolle. Außerdem hat sich der modulare und hierarchische Modellaufbau sowie die strikte Trennung von Modell und Experiment durchgesetzt. Diese Gesichtspunkte und die modernen Aspekte der Parallelisierung und Verteilung der Simulation sowie der objekt-orientierte Ansatz für die Simulation, die in Zukunft charakteristisch sein werden, haben die geforderte Funktionalität der Verwaltung und Speicherung der Daten in einem modernen Simulationssystem wesentlich verändert.

Der zweite Grund, der die Rolle des Datenmanagements wesentlich beeinflusst hat, wird durch die Anforderungen an moderne Simulationssysteme als Softwareprodukte der 5. Generation geliefert. Dabei steht die Forderung nach einer Unterstützung des Nutzers in allen Phasen einer Simulationsstudie an erster Stelle. Weiterhin wird die Integration von Banksystemen und die Bereitstellung von offenen Schnittstellen angestrebt. Zusätzlich dazu verlangt der Anwender das Vorhandensein einer anspruchsvollen Möglichkeit zur Datenauswertung und -repräsentation.

Aufgrund dieser Aussagen ist es notwendig, die Funktionalität der Datenverwaltung bezüglich der Modellierung und Simulation neu festzulegen. Dies muß im engen Zusammenhang mit den genannten Entwicklungstendenzen geschehen. Außerdem sind die Forderungen der Anwender und die unterschiedlichen Anwendungsgebiete zu berücksichtigen. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist in der Einbeziehung von anderen Teilgebieten der Informatik (z. B. Datenbanktechnologien) zu sehen ([Mart95]).

Eine Möglichkeit die geforderte Funktionalität der Verwaltung und Speicherung der Daten in einem Simulationssystem umzusetzen, besteht im Einsatz eines integrierten Simulationsbanksystems (SBS).

2 Das Simulationsbanksystem in SAMOS

2.1 Einordnung des Simulationsbanksystems in SAMOS

SAMOS (*Simulation And Modeling System*) ([DPP94], [Grüt92]) ist ein integriertes Simulations- und Modellierungssystem, welches auf die Lösung von Problemen im Umweltbereich zugeschnitten wurde. Es unterstützt den Anwender während des gesamten Lebenszyklus eines Simulationsmodells durch die Bereitstellung von Methoden zum einfachen Modellieren und Experimentieren. Die Abbildung 1 zeigt den modularen

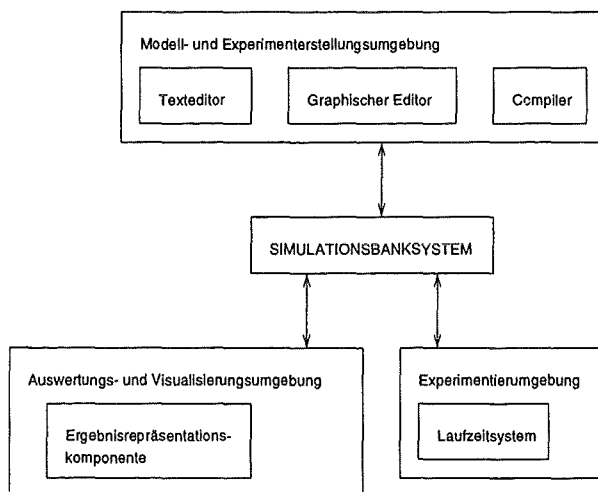


Abbildung 1: Einordnung des SBS in SAMOS

Aufbau des Systems SAMOS. Die Hauptkomponenten sind die Modell- und Experimentierstellungsumgebung, die Auswertungs- und Visualisierungsumgebung sowie die Experimentierumgebung. Das Simulationsbanksystem als separates Modul nimmt eine zentrale Position ein. Es übernimmt die Koordination und die Synchronisation der Kommunikation der anderen Komponenten, die mittels PVM realisiert wird.

2.2 Struktur des Simulationsbanksystems

Das Simulationsbanksystem (Abb. 2) setzt sich aus einem Simulationsbankverwaltungssystem (SBVS) und einer Anzahl von verschiedenen Banken zusammen. Es bildet die

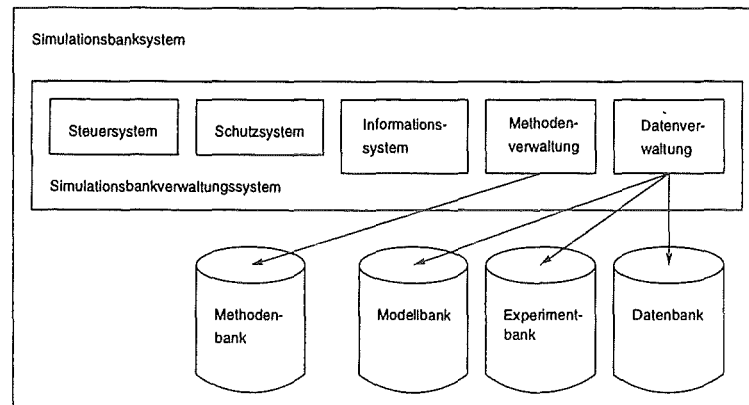


Abbildung 2: Struktur des Simulationsbanksystems

Schnittstelle zwischen SAMOS (Software) und dem Speichermedium (Hardware). Bei den Banken handelt es sich um den integrierten, einheitlich strukturierten Datenbestand des Gesamtsystems. Es wird zwischen Methoden-, Modell-, Experimentbank und einer allgemeinen Datenbank, die alle hierarchisch aufgebaut sind, unterschieden. Das SBVS dagegen ist ein System, daß einerseits eine Menge von Funktionen zur Manipulation und Verwaltung der Datenbestände in den Banken beinhaltet. Andererseits stellt es eine komfortable Benutzungsoberfläche als Schnittstelle zum Nutzer, ein Schutz-, ein Steuer- sowie ein Informationssystem bereit ([Mart95]).

2.3 Spezifikation

Da es sich bei dem SBS um ein komplexes Softwaresystems handelt, wird bei der Entwicklung auf das Phasenmodell der Softwaretechnik zurückgegriffen. Beim Entwurf des SBS stand daher die Anforderungsanalyse (3 Teile) im Mittelpunkt, mit dem Ziel den Informationsgehalt und die Funktionalität genau festzulegen.

2.3.1 Benutzeranalyse

Hier findet die Bestimmung des potentiellen Anwendungsgebietes und der speziellen Nutzergruppen statt. Der Einsatzbereich braucht an dieser Stelle nicht neu definiert zu werden, weil das SBS eine integrierte Komponente von SAMOS darstellt. Die Nutzer, die mit dem SBS arbeiten sollen, kann man wie folgt einteilen.

1. Entwickler und Anwendungsprogrammierer
2. Nutzer des Systems SAMOS

2.3.2 Datenbestandsanalyse

Im SBS werden drei Datenbestände, die für die Modellierung und Simulation wesentlich sind, unterschieden.

1. Modelle

Ein Modell beschreibt eine Klasse von Systemen, die erst durch Parameter, Inputgrößen usw. zu einem konkreten System wird. Modelle sind erstens durch ihre *Modellstruktur* (statische und dynamische Charakteristik) gekennzeichnet, die auch hierarchisch sein kann. Die Beschreibung der Struktur erfolgt mittels der Modellbeschreibungssprache SAME-MDL. Der zweite beschreibende Teil eines Modells ist in den *Bedingungen der Modellnutzung* zu sehen. Diese legen die Gültigkeitsgrenzen (Wertebereiche der Systemgrößen, Abstraktionsgrade u. ä.) fest. Den dritten Teil der Charakteristik eines Modells bildet die *Modelldokumentation*.

2. Experimente

Ein Experiment in SAMOS besteht aus einem *Verweis auf das Modell*, mit welchem experimentiert werden soll, der *Experimentbeschreibung* und den *Ergebnisdaten*. Die Experimentbeschreibung beinhaltet einen Experimentrahmen, in dem die Variablen, deren Beobachtung erwünscht ist, die Modellparameter, die Steuerparameter, die Initialwerte, die Abbruchbedingung sowie die Ausgabespezifikation beschreiben wird. Die Ergebnisdaten können nach Beendigung eines Laufes (Ausführung der Experimentbeschreibung) in Form von Zeitreihen, Einzelwerten, Häufigkeitstabellen bzw. als ereignis- oder signalabhängige Aufzeichnungen vorliegen.

3. allgemeine Daten

Zu diesem Datenbestand zählen die *Verwaltungsdaten*, die bei der System- und Nutzerverwaltung des SBS notwendig sind. Einerseits werden hier die Umgebungs- und Systemvariablen abgelegt. Und andererseits findet die Verwaltung der Nutzeridentifikationen und Zugriffsrechte statt.

2.3.3 Funktionsanalyse

Die Funktionsanalyse erfolgt für jede Komponente des SBVS (siehe Abb. 2) extra.

1. Steuersystem

- Realisierung der Kommunikation mit den anderen Komponenten des Systems SAMOS

- Bereitstellung einer ergonomischen Benutzungsoberfläche
- Analyse und Ausführung von Benutzeranweisungen
- Koordination und Synchronisation der anderen Teile des SBVS

2. Datenverwaltung

- Bereitstellung von Anschlußmöglichkeiten für verschiedene Datenbestände
- Kopplungs- und Integrationsmöglichkeiten für Datenbanksysteme
- Bereitstellung von Verwaltungs- und Manipulationsfunktionen bezüglich der Daten in den unterschiedlichen Banken
- Bereitstellung eines Versionenkonzeptes
- Entlastung des Nutzers von der Dateiarbeit und -organisation
- Verbergen der Details des Ladens und Speicherns
- Angebot von Recoverymöglichkeiten

3. Methodenverwaltung

- Bereitstellung von Verwaltungs- und Manipulationsfunktionen bezüglich der Methoden in der Methodenbank
- Überprüfung der Aufrufhierarchien von Methoden

4. Schutzsystem

- Durchführung von Zugriffskontrollen
- Konsistenzprüfungen

5. Informationssystem

- Bereitstellung von Katalogfunktionen
- Unterstützung bei der hierarchischen Modellerstellung
- Unterstützung bei der Anwendung des SBS
- Modell- und Methodendokumentation

2.4 Implementationsaspekte

Das SBS in SAMOS unterliegt den Prinzipien der Datenunabhängigkeit (Ebenen-Architektur). Daraus resultiert, daß die Methoden des SBS auf zwei unterschiedliche, von einander getrennte Ebenen, der logischen und der physischen (siehe Abb. 3), Zugriff haben. Das Erscheinungsbild der logischen Ebene ist bei fast allen Simulationssystemen sehr ähnlich gestaltet (soweit vorhanden). Entweder steht sie als separates Fenster zur

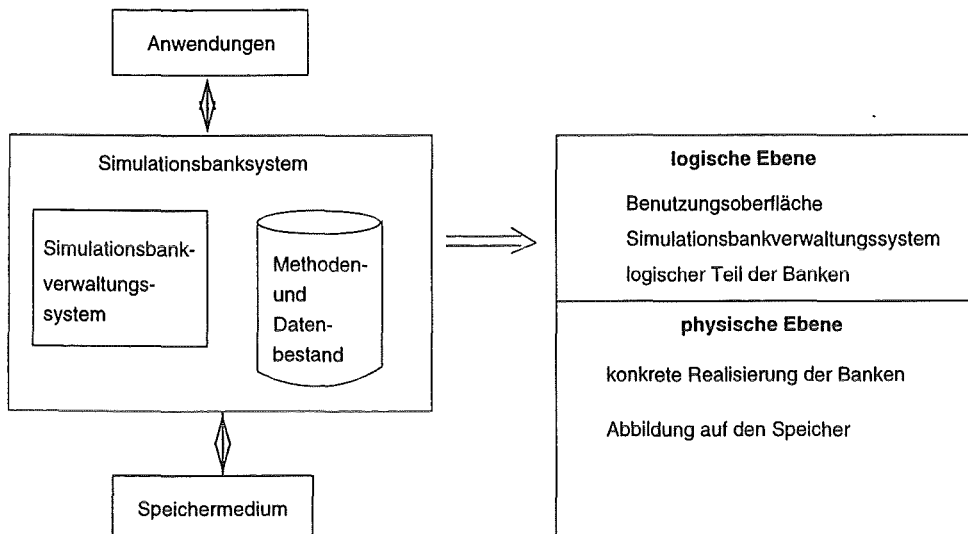


Abbildung 3: Zwei-Ebenen-Architektur des SBS

Verfügung oder ist in das Hauptfenster des Simulationssystems eingebettet. Die Funktionalität wird durch die obengenannten Aufgaben festgelegt. Die konkrete Realisierung der Banken (physische Ebene) dagegen kann auf verschiedenen Wegen erfolgen (siehe Abb. 4). Eine Möglichkeit besteht darin, die Banken auf eine Filestruktur abzubilden.

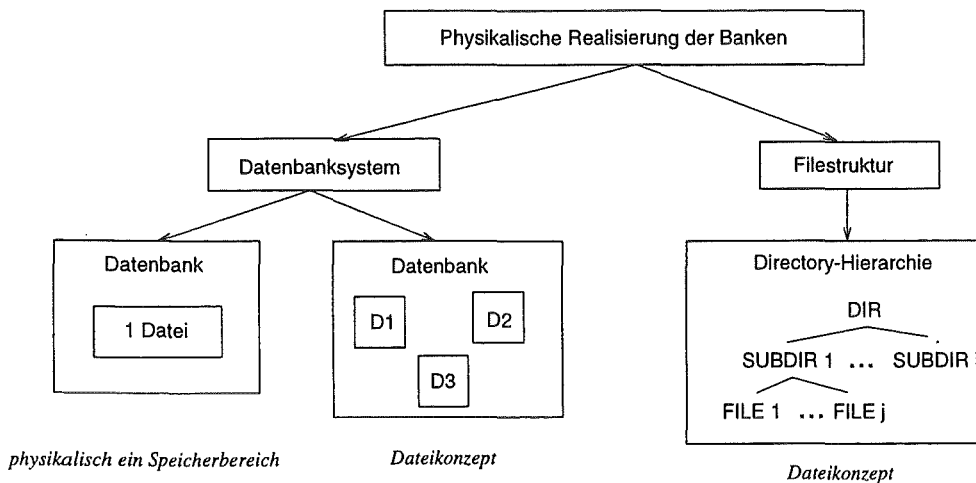


Abbildung 4: Realisierungsmöglichkeiten für die physische Ebene

Eine andere Variante ist die Nutzung eines kompletten Datenbanksystems als physische Ebene.

Aus den bisherigen Betrachtungen kann man die folgende Quintessenz für die prototypische Implementierung ziehen.

Das Simulationsbanksystem für SAMOS ist programmtechnisch für Workstations (UNIX) konzipiert und wurde in C++ unter Verwendung von OSF/MOTIF zur Gestaltung der Benutzungsoberfläche implementiert. Es stellt eine eigenständige Komponente dar und verfügt über definierte Schnittstellen sowie über eine graphische Benutzungsoberfläche (siehe Abb. 5). Für die Realisierung der physischen Ebene kommt die Abbildung auf das Filesystem von UNIX zur Anwendung.

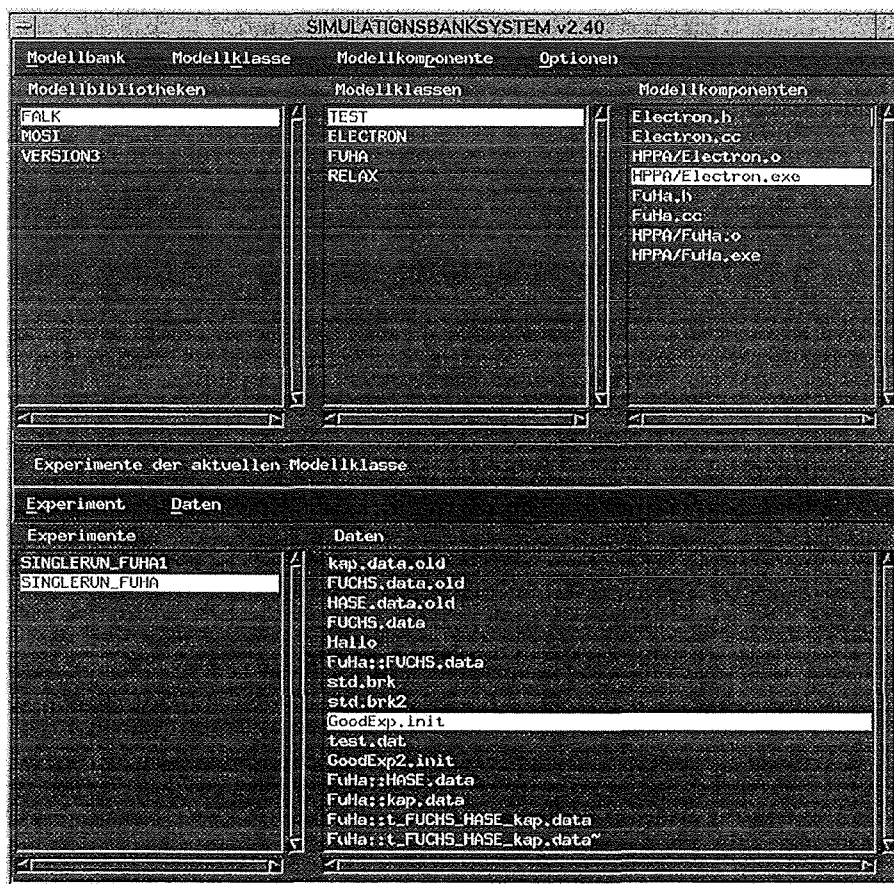


Abbildung 5: Benutzungsoberfläche des SBS

3 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Hauptaugenmerk auf das in das System SAMOS integrierte Simulationsbanksystem gelegt. Dabei ging es im wesentlichen um die Spezifikation und den Entwurf mit der Durchführung der Benutzer-, der Daten- sowie der Funktionsanalyse. Einen weiteren Platz nahm die Untersuchungen der Zwei-Ebenen-Architektur des SBS ein und dabei speziell die Möglichkeiten der Abbildung

der logischen auf die physische Ebene. Hierfür kann konstatiert werden, daß die Abbildung auf ein Filesystem des jeweiligen Betriebssystems heutzutage der gängige Weg ist. Die zweite Realisierungsvariante, die Abbildung auf ein Datenbanksystem, dagegen wird in der nahen Zukunft von Interesse sein. Daraus ergeben sich eine Vielzahl von Ansatzpunkten für die Forschung, so z. B.:

- Welche Variante der Kopplung eines Simulationssystems mit einem Datenbanksystem ist wann die günstigste?
- Welche Vor- und Nachteile bieten die unterschiedlichen Datenmodelle im Zusammenhang mit den zu verwaltenden Daten in einem Modellierungs- und Simulationssystem?
- Welche sprachlichen Schnittstellen eines DBS existieren und wie können diese sinnvoll angewendet werden?
- Welche unterstützenden Funktionen in Bezug auf die Modellierung und Simulation bieten existierende Datenbanksysteme an?
- Wie weit zerlegt man die Modell- und Experimentdaten, um sie als Einzelteile in einem DBS abzulegen?

Literatur

- [DPP94] E. Dimitrov, S. Pawletta, Th. Pawletta: *Simulationsumgebungen zur Problemlösung im Umweltbereich (SAME)*;
Forschungsbericht, Universität Rostock, FB Informatik, 1994.
- [Grüt92] R. Grützner: *Simulationsumgebungen für Modell- und Experimentbeschreibungen im Umweltbereich*;
Beiträge zum Workshop Modellierung und Simulation im Umweltbereich, Universität Rostock, FB Informatik, 1992.
- [Mart95] F. Martini: *Simulation und Datenbanken: Analyse von Simulationssystemen bezüglich des integrierten Datenmanagements*;
Forschungsstudie, Universität Rostock, FB Informatik, 1995.
- [Mart96] F. Martini: *Struktur und Verwaltung von Simulationsbanken als integrativer Bestandteil moderner Simulationssysteme*;
Preprint, Universität Rostock, FB Informatik, 1996.



**11 Methoden und Werkzeuge für die Kopplung von
(Umwelt-) Simulationsmodellen und deren
Integration in ein GIS.**

Conrad, R.

Methoden und Werkzeuge für die Kopplung von (Umwelt-)Simulationsmodellen und deren Integration in ein GIS*

Rainer Conrad
Institut für Geoökologie, SFB 179
TU Braunschweig
Langer Kamp 19c
38106 Braunschweig, Germany
e-mail: conrad@sfbsun.ifgug.nat.tu-bs.de

Zusammenfassung

Für die Simulation ökologischer Prozesse existieren viele verschiedene Simulationsmodelle. Jedes Modell deckt dabei einen Bereich bezüglich bestimmter Fragestellungen ab. In Agrar-Öko-Systemen können für den Wasser- und Stofftransport z.B. drei größere Bereiche mit unterschiedlichen Prozessen voneinander abgegrenzt werden, die alle mit partiellen und gewöhnlichen Differentialgleichungen modelliert sind (1- bis 3-dimensional und z.T. mit der Finite-Elemente-Methode gelöst): die bodennahe Luftschicht, die wasserungesättigte Bodenzone mit dem Pflanzenwachstum und die gesättigte Zone. Diese Bereiche sind gegenseitig stark voneinander abhängig, so daß die Simulation des gesamten komplexen Systems zur Lösung übergreifender Fragestellungen die ständige Interaktion der verschiedenen Bereiche und somit die Kopplung der Modelle verlangt. Die Fülle an räumlich-zeitlichen Daten zieht die Integration der Modelle in ein geographisches Informationssystem (GIS) zwingend nach sich, um sie überhaupt handhaben zu können. Da die Entwicklung eines solchen Umweltsimulations- und -informationssystems viele Probleme aufwirft, wird in diesem Beitrag das Vorgehen und dabei das Lösen grundlegender Probleme beschrieben.

1 Einleitung

Seit den 50er Jahren hat ein starker Wandel in der Landwirtschaft gerade im dichtbesiedelten Mitteleuropa zu einer Bedrohung und teilweisen Zerstörung des ökologischen Gefüges geführt. Die typischen, arten- und biotopreichen Kulturlandschaften sind im Rahmen der Industrialisierung in der Landwirtschaft der weitgehenden

*Diese Arbeit wurde gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im SFB 179, TP A1

Nivellierung der Agrarlandschaften zum Opfer gefallen. Der übermäßige Einsatz an Pflanzenschutzmitteln und Düngern führt zur Belastung wertvoller Trinkwasservorräte sowie der Atmosphäre (s. z.B. [HKMR94]).

Die Bewertung der Belastung und deren Veränderung durch andere Bewirtschaftungsstrategien muß notwendigerweise mit Hilfe von komplexen Simulationsmodellen erfolgen, die auf partiellen und gewöhnlichen Differentialgleichungen basieren. Für eine differenzierte Betrachtung können verschiedene Fragestellungen sinnvoll sein, die unterschiedliche Ausschnitte desselben Ökosystems ins Visier nehmen und dadurch auch in Teilen unterschiedliche Modelle verwenden. Dies soll an drei Beispielen verdeutlicht werden:

Einerseits möchte man das ökologische Schicksal von Verschmutzern in kleinen Einzugsgebieten für den Trinkwasserschutz simulieren. Dafür werden die drei Bereiche obere (wasserungesättigte) Bodenzone, gesättigte Zone und Atmosphäre unterschieden, deren Prozesse sehr stark voneinander differieren und die somit getrennt von verschiedenen Fachleuten modelliert werden. Die ungesättigte Zone wird üblicherweise mit eindimensionalen Reaktions-Diffusionsgleichungen modelliert und die gesättigte Zone sowie die Atmosphäre mit dreidimensionalen Gleichungen, die mit der Finite-Elemente-Methode gelöst werden. Andererseits kann beim Ökosystem-Management für Niedermoore ein Hydrologie- und ein Habitatmodell für Wasserhaushalt und Populations-, Bestandes- und Nährstoffdynamik voneinander abgegrenzt werden, so daß z.B. Fragen bzgl der Renaturierung geklärt werden können. Als letztes soll der Hochwasserschutz bei größeren Einzugsgebieten untersucht werden. Es werden die Bereiche ungesättigte Zone mit vertikalem Fluß, Oberflächenabfluß, Zwischenabfluß und Routing für Vorfluter und Flüsse unterschieden.

Die starke gegenseitige Abhängigkeit der Bereiche führt dazu, daß Ergebnisse eines Modells bei allen Fragestellungen als Randbedingungen in die Berechnungen der anderen Modelle eingehen. Damit in regelmäßigen Zeitschritten Daten ausgetauscht werden können, ist ihre Kopplung notwendig. Für alle anfallenden Daten soll die Visualisierung ermöglicht werden. Die Visualisierung und ein Teil der Datenvorbereitung für die Simulationen soll mit Hilfe eines geographischen Informationssystems erfolgen, da es für die Verwaltung und Verarbeitung großer Mengen räumlicher Daten konzipiert ist.

An dieser Stelle könnte man fragen, warum keines der existierenden oder entstehenden Modellierungs- und Simulationssysteme wie SIMPLEX II [Sch95] oder SAMOS [GHP94] Verwendung finden. Keines dieser Systeme kann mit partiellen (also raumbezogenen) Differentialgleichungen umgehen, da zu viele verschiedene Lösungsverfahren nötig wären. Die betrachteten Prozesse sind aber derartig komplex, daß partielle Differentialgleichungen unumgänglich sind. Eine einfachere Modellierung wäre dort unzulässig.

Im folgenden wird zunächst ein Überblick über die Struktur des entstehenden Umweltsimulations- und -informationssystems gegeben. Es ist in Anlehnung an

[MPM⁺95, GHP94] bankenbasiert, da so bei Erweiterungen keine strukturellen Veränderungen erforderlich sind, sondern nur die weiteren Bausteine in die Banken eingepaßt werden müssen. Daran anschließend wird eine Methode zum Aufbau und damit zur Erweiterung solcher Systeme entwickelt. Diese ist untergliedert in die Bereiche Kopplung der Simulationsmodelle und Integration der Modelle in das GIS.

2 Überblick über das Umweltsimulations- und -informationssystem

Die Grundlage des Systems bilden fünf Banken: Die Visualisierungsbank, die Experimentbank, die Modellbank, die Methodenbank und die Datenbank. In der Datenbank werden sowohl die Simulations- und Meßdaten als auch die Meta-Informationen gehalten, die zur Benutzung der anderen vier Banken notwendig sind. Die Methodenbank beinhaltet u.a. die Prozeduren für die Transformation der Daten zwischen den Modellen und zum Vor- und Nachbereiten der Simulationsdaten. Die Modelle, die in Standardprogrammiersprachen implementiert und mit Hilfe der in [Con95] vorgestellten dynamischen Meta-Sprache für die Ein- und Ausgabe (DMSQL) für die Kopplung vorbereitet sind, werden in der Modellbank abgelegt. In der Experimentbank werden Simulationsläufe, -experimente und -studien sowie Simulationsabläufe verwaltet. Während Simulationsläufe, -experimente und -studien eine hierarchische Gliederung und Zuordnung der Simulationen darstellen [VDI], beschreiben die Simulationsabläufe die Abfolge der Schritte der Simulationen, d.h. wie verschiedene Modelle miteinander gekoppelt werden. Die Simulationsabläufe können immer wieder verwendet aber auch ergänzt werden. Die Visualisierungsbank beinhaltet die Visualisierungstechniken und Vorbereitungstools. So werden die Daten erst vorbereitet, bevor dann die Visualisierungstechnik aufgerufen wird.

Zur Erfüllung ihrer Aufgaben bedienen sich drei Manager der Banken. Das Vor- und Nachbereiten der Simulationsdaten wird von einem Processingmanager überwacht. Ein Simulationsmanager stellt aus den Informationen der Experiment-, Modell- und der Methodenbank die Simulationsläufe zusammen und regelt den Ablauf. Ein Visualisierungsmanager stellt entsprechend der Wünsche der Benutzerin mit den Vorbereitungstools die Daten zusammen, die die aufzurufende Visualisierungstechnik benötigt. Die Oberfläche und der Visualisierungsmanager sowie die Visualisierungsbank werden mit Hilfe des Geographischen Informationssystems ARC/INFO realisiert, da es viele für die Visualisierung raumbezogener Daten und für die Benutzerführung notwendige Funktionen bereitstellt. Diese gesamte Struktur, die in Abbildung 1 dargestellt wird, läßt das Umweltsimulations- und Informationssystem offen für Erweiterungen, da durch das Prinzip der Unterteilung in Manager und Banken zusätzliche Bausteine nur in die Banken eingefügt werden

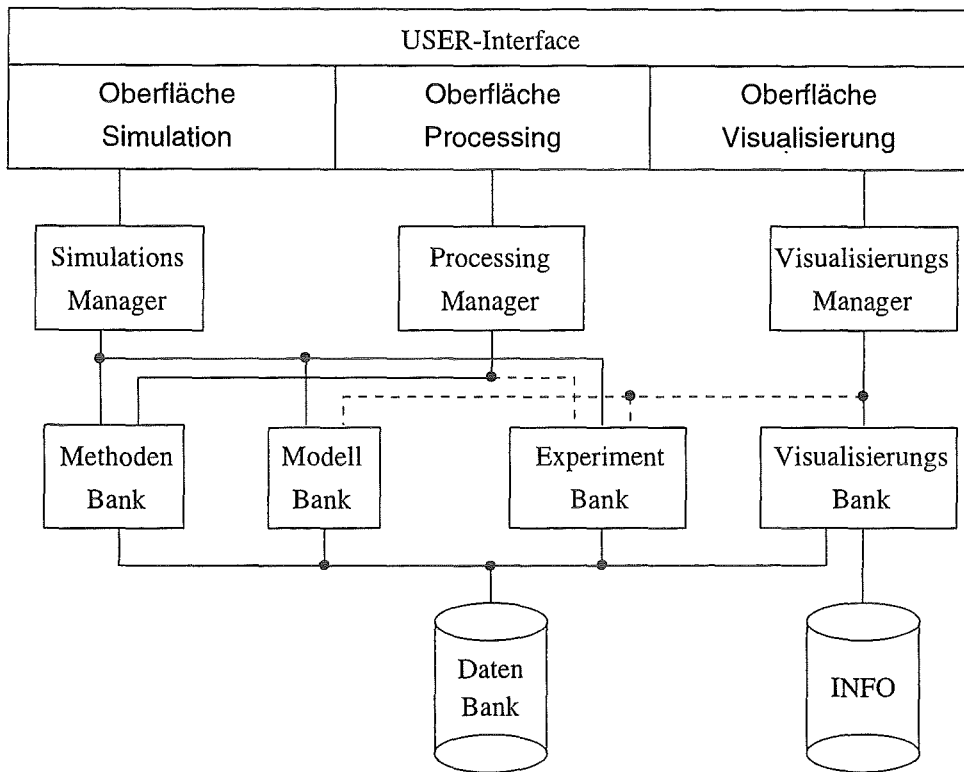


Abbildung 1: Überblick über das Umweltsimulations- und -informationssystem

müssen. Dadurch können auch verschiedene Modelle, die das gleiche simulieren, zum Vergleich integriert werden.

3 Methode für die Kopplung der Simulationsmodelle

Die Vorgehensweise ist an das klassische Wasserfallmodell angelehnt (s. z.B. [GJM91]). Für sie sind folgende Phasen des Softwareentwicklungsprozesses wichtig: Anforderungsanalyse, Spezifikation, Entwurf, Kodierung, Systemintegration und Test. Besondere Beachtung findet das Reengineering bestehender Software (insbesondere der Simulationsmodelle). Reengineering ist nach [CC90] die Überprüfung und Änderung von Software, wobei sie mindestens in den für die aktuellen Bedürfnisse relevanten Teilen analysiert und wieder entworfen wird. Es verwendet zum einen das Reverse Engineering, bei dem aus dem Programm-Code und der Dokumentation die Struktur analysiert und dargestellt wird, so daß ein gut dokumentierter Entwurf entsteht. Fehler und Schwächen, die aufgrund des so entstandenen Entwurfs entdeckt werden, können nun behoben werden. Dafür muß zum Teil in frühere Phasen zurückgesprungen und dann im Sinne des Wasserfallmodells phasenweise vorgegangen werden. Zu beachten ist, daß dabei Teile des Programm-

Codesbestehen bleiben können, während andere Teile völlig umstrukturiert werden müssen.

Bei der Kopplung werden zwei Bereiche unterschieden: das Reengineering der Simulationsmodelle und die Entwicklung des Simulationsmanagers.

3.1 Reengineering der Simulationsmodelle

Der erste Schritt besteht in dem Reverse Engineering der Ein- und Ausgaben für einen Simulationslauf. Hierfür steht meistens eine E/A-Dokumentation und der Programm-Code zur Verfügung. Für diese Analyse bietet sich ein semantisches Datenmodell wie z.B. ein erweitertes ER-Modell (EER-Modell) an [EGH⁺92, Gog94, Hoh93]. Die Simulationsdaten werden dabei als Eigenschaften von Objekttypen, Beziehungstypen zwischen den Objekten und Komponenten modelliert. Abbildung 2 zeigt als Beispiel ein EER-Diagramm des Simulationsmodells Simulat [DNR95] für die ungesättigte Zone. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Eigenschaften (Attribute) bis auf Schlüsselattribute weggelassen. In Abbildung 3, einem Ausschnitt aus dem Gesamtdiagramm, sind die Attribute vollständig erfaßt.

Im folgenden sollen die Modellierungskonstrukte kurz erläutert und an Beispielen aus den beiden EER-Diagrammen verdeutlicht werden: Objekttypen sind Ansammlungen von „gleichartigen“ Objekten, wie z.B. *STOFFE* und *PESTIZIDE*. Diese haben Eigenschaften, die Attribute (*Abbaumodell* bei *PESTIZIDE*). Schlüsselattribute identifizieren die Objekte (*PestizidNr*). Beziehungen zwischen den Objekten werden in Form von Beziehungstypen modelliert (*zerfällt zu* zwischen den Objekttypen *PESTIZIDE* und *STOFFE*). Komponenten oder objektwertige Attribute modellieren die Tatsache, daß ein Objekt aus anderen Objekten bestehen kann (ein *PESTIZID* ist auch ein *STOFF*; dies wird über das objektwertige Attribut *Stoff* gekennzeichnet). Die so entstandenen EER-Diagramme können mit dem Transformationsalgorithmus von [Hoh93] in Relationen umgesetzt werden.

Des weiteren sollen in diesem ersten Schritt drei Arten von Simulationsdaten ausgewiesen werden, da sie im weiteren Verlauf des Entwurfs unterschiedlich behandelt werden: Steuerparameter, allgemeine Daten, auf die von verschiedenen Simulationsläufen immer wieder zugegriffen wird (Abbildung 3 zeigt diese für Simulat), und simulationslaufspezifische Parameter, wie Kompartimente, Initialwerte und Ergebnisse. Zusätzlich müssen für den weiteren Entwurf dynamische Attribute dokumentiert werden. Bei dynamischen Attributen wird in Abhängigkeit von den Steuerparametern entschieden, ob oder wie häufig sie zur Laufzeit benötigt werden. Z.B. ist die Anzahl von zu simulierenden Stoffen sowie die zu speichernden Zustandsgrößen simulationslaufabhängig.

Nach dem Reverse Engineering müssen nun schrittweise die Änderungen erarbeitet werden. Häufig werden alle Zustandsgrößen in jedem (oder jedem n-ten) Zeitschritt

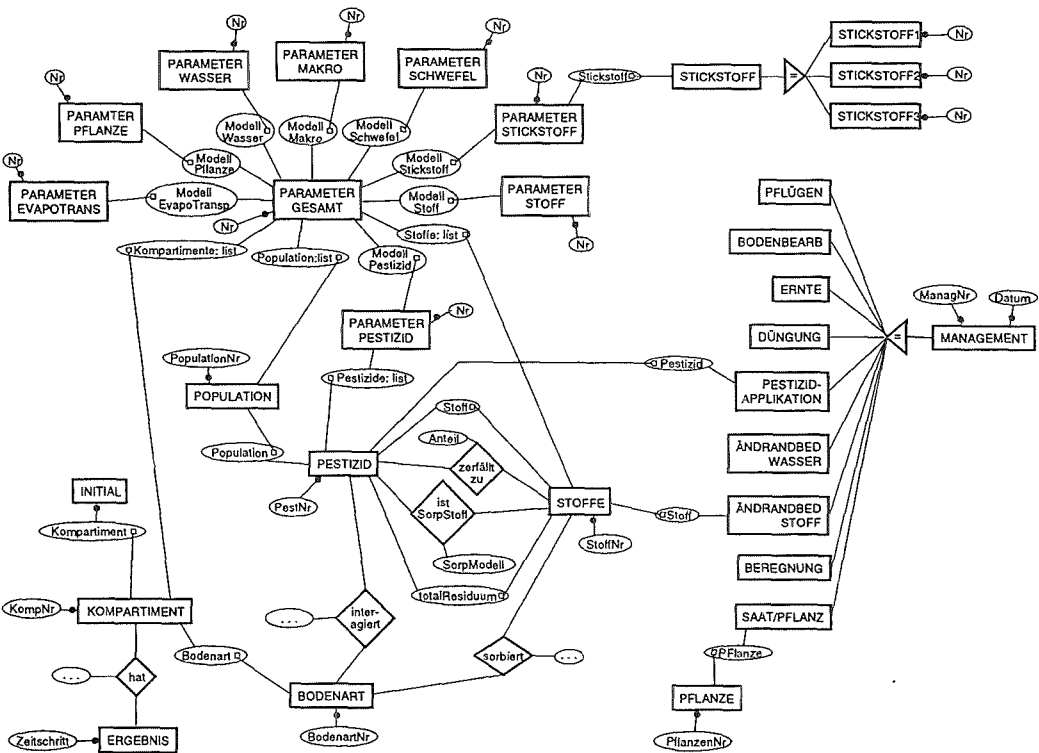


Abbildung 2: E/A-Modellierung des Simulationsmodells Simulat

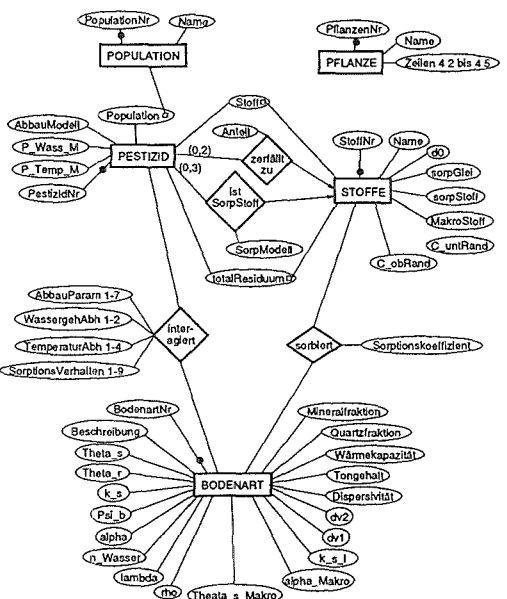


Abbildung 3: Ausschnitt aus der E/A-Modellierung: Allgemeine Daten

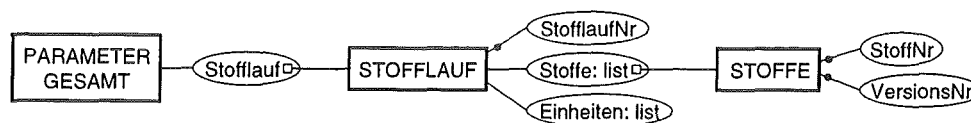


Abbildung 4: Versionsverwaltung und Zuordnung zu einem Simulationslauf

als Ergebnisse herausgeschrieben. Da aber meistens nur wenige Resultate eines Simulationslaufs benötigt werden, sollte die Modellierung so verändert werden, daß die Zustandsgrößen und die räumlichen und zeitlichen Punkte, die gespeichert werden sollen, wählbar sind.

Nun muß über die Datenmodellierung eine Simulationslaufverwaltung gelegt werden. Es wurden allgemeine Daten ausgewiesen. Die einzelnen Datensätze sind aber der Kalibrierung ausgesetzt, so daß verschiedene Versionen eines Datensatzes entstehen. Ein einfacher Ansatz wäre die vollständige Duplizierung aller allgemeinen Daten und Veränderung der kalibrierten Parameter, um eine neue Version zu erhalten. Es ist leicht einzusehen, daß hiermit sehr große (und unkontrollierte) Redundanz entsteht. Ein Ansatz, bei dem keine Redundanz entsteht, ist die Erzeugung von Kern-Datensätzen und darauf aufsetzend die Kalibrierungen der einzelnen Parameter, so daß für die korrekte Zuordnung der Parameter zu einem Simulationslauf eine weitere Relation benötigt wird, in der die Versionsnummer jedes veränderten Parameter mit der Simulationslaufnummer aufgeführt wird. Effizienz und leichte Zugriffsmöglichkeiten sind so nicht gewährleistet. Ein guter Kompromiß zwischen diesen beiden Extremen besteht darin, daß jeder Datensatz selbständig versioniert und jedem Simulationslauf die benötigten Datensätze inklusive der Versionsnummern zugeordnet werden. Redundanz entsteht, da einige Parameter bei unterschiedlichen Versionen gleich sind. Es bleibt aber im allgemeinen eine überschaubare Anzahl von Versionen, so daß man von kontrollierter Redundanz sprechen kann. Mit dieser Realisierung ist der Effizienzverlust in akzeptablen Grenzen gehalten, da für jeden Datensatz nur eine Versionsnummer für einen Simulationslauf zugeordnet werden muß.

Somit wird jeder aus dem Datenschema entstandenen Relation mit allgemeinen Daten eine weitere zugeordnet, die die Versionenverwaltung übernimmt. Die Datensätze der Versionenverwaltung müssen nun noch von den Steuerparametern referenziert werden. Abbildung 4 zeigt an einem ausgewählten Beispiel den Zusammenhang zwischen Steuerparameter, Versionenverwaltung und allgemeinen Daten. Zur Vervollständigung der Simulationslaufverwaltung erhalten noch die simulationsspezifischen Daten eine Identifizierung, wobei darauf zu achten ist, daß z.B. Anfangs- und Randbedingungen mehrfach verwendbar sein sollten. Nur die Simulationsergebnisse sollten eindeutig mit dem Simulationslauf identifiziert werden.

Der nächste Schritt besteht in der Analyse des Datenaustauschs im Zusammenspiel der Modelle. Hier gilt es herauszufiltern, welche Randbedingungen als Ergebnisse vom anderen Modell geliefert werden. Im Hinblick auf Erweiterungen des Simulationssystems empfiehlt es sich, die Ausschnitte des Ökosystems, welches man

betrachten möchte, zu modellieren. [LRH94] zeigt die Modellierung eines Ökosystems mit Hilfe des EER-Modells. So kann man die Zusammenhänge und dadurch die Schnittstellen zwischen den Simulationsmodellen erkennen.

Nun kann entschieden werden, welche Daten über welches E/A-Medium ein- bzw. ausgegeben werden. Der Datenaustausch mit den anderen Modellen erfolgt über Interprozeßkommunikation (IPC). Zur besseren Strukturierung und um besser vom GIS sowie von den Modellen auf die Daten zugreifen zu können, sollten die meisten Daten in einer relationalen Datenbank gehalten werden. Nur Daten, die effizienz-kritisch sind, wie z.B. Klimadaten, die stündlich aufgelöst sind, sollten noch über Dateien eingelesen werden.

Nachdem die Ein- und Ausgabe sorgfältig entworfen wurde, können weitere Veränderungen des Programm-Codes analysiert, entworfen und spezifiziert werden. Dies ist das Reengineering der Simulationsprogramme. Da die Prozesse, die in den verschiedenen Simulationsprogrammen behandelt werden, unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen, muß eine weitere (externe) Zeitschrittebene zum Datenaustausch eingeführt und damit die Simulationsschleife in zwei Schleifen aufgespalten werden. Mit der äußeren Schleife werden die externen Zeitschritte abgearbeitet und mit der inneren die internen Zeitschritte eines externen. Die Länge dieser externen Zeitschritte darf die numerische Stabilität nicht beeinträchtigen. Innerhalb der externen Schleife müssen die Ergebnisse für den Datenaustausch vorbereitet, die Daten übergeben, das Programm deaktiviert, die Randbedingungen von anderen Modellen gelesen, diese insbesondere unter Berücksichtigung der Massenbilanzen in das Modell eingearbeitet und simuliert werden. Um die programm-internen Daten, die extra für die Kopplung benötigt werden, von den übrigen Daten zu separieren, empfiehlt es sich diese in einer Datenstruktur, gewissermaßen als „Kopplungsleitblock“, zu halten.

Im Falle eines Moving-Boundary Problems, der Veränderung des Gebietes eines Simulationsmodells, muß mit besonderer Sorgfalt gearbeitet werden, da hier nicht nur Flüsse über den Rand, sondern auch der bewegliche Rand das Gebiet eines anderen Modells beeinflussen kann. Im Beispiel der Kopplung ungesättigter mit gesättigter Zone ist die Grundwasseroberfläche der bewegliche Rand.

Nachdem der Entwurf für die Simulationsmodelle fertiggestellt wurde, kann mit der Kodierung begonnen werden. Für die notwendige Umstellung der Ein- und Ausgaben auf Datenbank (Strukturierung und Integration in das GIS) und Interprozeßkommunikation (Kopplung der Modelle) wurde die eingebettete E/A-Sprache DMSQL entwickelt [Con95], die die drei E/A-Medien Datenbank, Interprozeßkommunikation und Datei auf die gleiche abstrakte Art und Weise behandelt, so daß die verschiedenen schwierigen technischen Details, wie insbesondere die dynamischen Zugriffe, vor dem Benutzer verborgen werden. Durch ihre Ähnlichkeit zu SQL ist die Sprache einfach zu erlernen.

3.2 Entwicklung des Simulationsmanagers

Der Simulationsmanager soll den Ablauf der verschiedenen Simulationsszenarien steuern. Die Simulationsmodelle sollen einzeln aber auch in verschiedenen Kopplungsvarianten laufen können, um unterschiedlichste Fragestellungen bearbeiten zu können. Dies ist am einfachsten dadurch zu realisieren, daß die Informationen über den genauen Simulationsablauf aus dem Manager herausgezogen und als Meta-Informationen in der Datenbank abgelegt werden, so daß im Simulationsmanager nur die Struktur des allgemeinen Simulationsablaufes erhalten bleibt.

Der (generische) Simulationsmanager besteht aus folgenden Abschnitten: Initialisierung, Vorlauf, Hauptschleife und Nachlauf. In der Initialisierungsphase wird der aktuelle Simulationsablauf eingelesen. Der Vorlauf enthält das Einlesen der Daten, die für den Simulationsablauf notwendig sind, das Starten der Simulationsmodelle und gegebenenfalls den nullten oder ersten Zeitschritt eines Modells. Die Hauptschleife umfaßt das Simulieren eines Zeitschritts mit jedem Modell und die Transformation zwischen den Modellen. Ein Nachlauf, in dem z.B. die Interprozeßkommunikation beendet wird, beschließt den Simulationsablauf. Der Simulationsmanager ruft für jeden einzelnen Schritt die entsprechende Methode aus der Methodenbank auf.

Damit der Simulationsmanager seine Informationen überhaupt bekommen kann, müssen die Meta-Informationen analysiert und entworfen werden. Dabei erfahren die unterschiedlichen Arten von Aktionen, wie das Starten, die Transformationen etc., verschiedene Behandlungen. Des weiteren werden die benötigten Methoden analysiert, entworfen, implementiert und integriert. Es sind die Methoden zur Transformation der Daten zwischen den Simulationsmodellen, zum Einlesen der Steuerdaten und zum Starten und Steuern der Modelle.

4 Methode zur Integration der Modelle in das GIS

Der zweite wesentliche Komplex innerhalb des Umweltsimulations- und -informationssystems ist neben der Kopplung der Simulationsmodelle die Visualisierung der Simulationsdaten. Im folgenden sollen deshalb die Komponenten Visualisierungsmanager, Visualisierungstechniken und Visualisierungsvorbereitung vorgestellt und das Vorgehen beim Entwurf beschrieben werden. Die Techniken und die Vorbereitung sind als Visualisierungsbank zusammengefaßt.

Im ersten Schritt werden die Visualisierungstechniken, die dann innerhalb des GIS realisiert werden, analysiert und entworfen. Um diese so allgemein und damit so wiederverwendbar wie möglich zu gestalten, müssen sämtliche notwendigen Daten (Simulationsdaten sowie Legendeninformationen) vorher vorbereitet sein und der

Visualisierungstechnik übergeben werden. Im Sinne des Reengineering sollte hier auf vorhandene Software zurückgegriffen und diese in das System eingepaßt werden.

Daran schließt sich die Analyse an, welche Art von Daten mit welcher Technik sinnvoll visualisiert werden sollen und können. Das Ergebnis wird als Meta-Information in der Datenbank abgelegt, so daß von der Oberfläche für die Visualisierung und vom Visualisierungsmanager darauf zugegriffen werden kann.

Die Vorbereitungstools für die Visualisierung werden in Anlehnung an die Methode in Abschnitt 3 entwickelt. Die Entwicklung des Visualisierungsmanagers, der die Vorbereitungstools und die Techniken entsprechend der Wünsche der Benutzerin aufrufen soll, wird an den Simulationsmanager angelehnt. Auch hier soll nur die Struktur direkt implementiert und die Informationen über die korrekten Aufrufe als Meta-Informationen in der Datenbank abgelegt werden. Im Gegensatz zum Simulationsmanager existieren hier keine festen Abläufe, statt dessen müssen sie aus den Meta-Informationen zusammengestellt werden. Folgende Informationen werden u.a. benötigt: wie welche Daten abgelegt sind, wo die Daten zu dem gewünschten Simulationslauf zu finden sind, welche Technik welche Eingaben benötigt und welche Vorbereitung welche Art von Daten in welches Format überführt. Die Komplexität erfordert eine besonders sorgfältige Modellierung.

5 Abschließende Bemerkungen

In diesem Beitrag wurde die Struktur eines mit Hilfe eines GIS realisierten Umweltsimulations- und -informationssystems vorgestellt. Bestehende Software, insbesondere die in vielen Jahren gewachsenen Simulationsmodelle, wurde aufgegriffen und im Sinne des Reengineering in das System eingepaßt. Die Manager, die die Steuerung übernehmen, wurden generisch gestaltet, d.h., daß die Informationen, die die Grundlage für ihre Entscheidungen bilden, nicht im Programm-Code versteckt, sondern als Meta-Daten leicht verfügbar in der Datenbank abgelegt sind. Damit wurde der Evolution, die jede größere Software durchläuft, Rechnung getragen, indem Strukturen geschaffen wurden, in die Erweiterungen problemlos als Bausteine eingefügt werden können.

Literatur

- [CC90] E.J. Chikofsky und J.H. CrossII. Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. *IEEE Software*, 7(1):13-18, 1990.
- [Con95] R. Conrad. Konzepte bei der Kopplung von Umweltsimulationsmodellen und einem GIS. In H. Kremers und W. Pillmann, Herausgeber, *Raum und Zeit in Umwelthinformationssystemen*, S. 354-360, Marburg, 1995. 9. Internationale Symposium Umweltinformatik '95, Metropolis.

- [DNR95] B. Diekkrüger, P. Nörtersheuser und O. Richter. Modeling pesticide dynamics of a loam site catchment using HERBSIM and SIMULAT. *Ecological Modelling*, 81(1-3):111-119, 1995.
- [EGH⁺92] G. Engels, M. Gogolla, U. Hohenstein, K. Hülsmann, P. Löhr-Richter, G. Saake und H.-D. Ehrlich. Conceptual Modelling of Database Applications Using an Extended ER Model. *Data and Knowledge Engineering*, 9(2):157-204, 1992.
- [GHP94] R. Grützner, A. Häuslein und B. Page. Softwarewerkzeuge für die Umweltmodellierung und -simulation. In B. Page und L.M. Hilty, Herausgeber, *Umweltinformatik — Informatikmethoden für Umweltschutz und Umweltforschung*, Kapitel 9, S. 157-182. Oldenbourg, München, 1994.
- [GJM91] C. Ghezzi, M. Jazayeri und D. Mandrioli. *Fundamentals of Software Engineering*. Prentice Hall International Editions, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [Gog94] M. Gogolla. *An Extended Entity-Relationship Model — Fundamentals and Pragmatics, Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Band 767. Springer, 1994.
- [HKMR94] Alois Heißenhuber, Jens Katzek, Florian Meusel und Helmut Ring. *Landwirtschaft und Umwelt, Umweltschutz — Grundlagen und Praxis*, Band 9. Economica Verlag, 1994.
- [Hoh93] Uwe Hohenstein. *Formale Semantik eines erweiterten Entity-Relationship-Modells, Teubner-Texte zur Informatik*, Band 4. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1993.
- [LRH94] P. Löhr-Richter und V. Himmler. Ein EER-basiertes Datenbankschema für Ökosysteme. In H. Kremers, Herausgeber, *Umweltdatenbanken*, S. 59-86. Metropolis, Marburg, 1994.
- [MPM⁺95] R. Meyer, M. Poll, H. Mügge, B. Gerken und L.M. Hilty. Anforderungen für den Einsatz eines geographischen Informationssystems (GIS) in der umweltbezogenen Verkehrssimulation. In H. Kremers und W. Pillmann, Herausgeber, *Raum und Zeit in Umweltinformationssystemen; 9. Symposium Informatik im Umweltschutz*, S. 376-384. Metropolis-Verlag, 1995.
- [Sch95] B. Schmidt. *SIMPLEX II, Ein integriertes Simulationssystem*. SCS, Society for Computer Simulation Int., Erlangen, Ghent, Istanbul, San Diego, 1995.
- [VDI] VDI. VDI-Richtlinie 3633, Blatt 6. VDI Düsseldorf; Beuth Verlag, Berlin.

**12 Die normative (Brems)Kraft der Modellbildung
für eine fortschrittliche Verkehrs- und
Umweltpolitik.**

Schmidt, M.

Die normative (Brems)Kraft der Modellbildung für eine fortschrittliche Verkehrs- und Umweltpolitik

Mario Schmidt¹

Einleitung

Die Modellierung des Personenverkehrs spielt eine zentrale Rolle in der Verkehrsplanung: für den Ausbau des Straßennetzes, die Erweiterung des ÖPNV-Angebotes, sogar für Maßnahmen im Rahmen des Klimaschutzes (Schmidt, 1994). Aufgabe der Modellierung ist nicht nur eine möglichst wirklichkeitsgetreue Beschreibung der Verkehrsmengen für verschiedene Verkehrsmittel auf verschiedenen Verkehrsrelationen, sondern auch eine kausale Beschreibung der komplexen Zusammenhänge zwischen den Ursachen der Mobilität und dem Ergebnis „auf der Straße“. Deren Beschreibung ist die Basis für die Erstellung von Prognosen und Szenarien.

Viele dieser Zusammenhänge lassen sich modellieren und führen zu befriedigenden Ergebnissen, z. B. zu der absoluten Anzahl der Verkehrswege oder -fahrten, dem Modal Split zwischen den Verkehrsmitteln oder den Verkehrsstärken auf bestimmten Straßen. Die zur Verfügung stehenden Modelle haben inzwischen ein hohes Niveau erreicht und sind – dank der Computerentwicklung – komfortabel und flexibel einsetzbar.

Gewisse Annahmen der Modellbildung schließen jedoch die Simulation von bestimmten Maßnahmen aus. Sie lassen sich nicht quantifizieren, da die Modelle Zusammenhänge vernachlässigen, auf exogen bestimmte Größen zurückgreifen, verschiedene Randbedingungen unverändert lassen oder schlicht die empirische Fundierung von möglichen Wirkungszusammenhängen fehlt.

Bedauerlicherweise liegen diese Maßnahmen meisten in jenen Bereichen, die derzeit im Vordergrund des Interesses an einer umweltfreundlicheren oder ökologisch nachhaltigen Verkehrsplanung stehen: nämlich im Bereich der Verkehrsvermeidung, der Beeinflussung der Mobilitätsursachen auf den Ebenen der Raumstruktur, der sozialen und wirtschaftlichen Einflußgrößen oder der Verhaltensänderungen.

Die Umkehr der Realität-Modellbildungskette

Die Vereinfachung der Realität und die Reduktion auf die wichtigsten Wirkungszusammenhänge ist quasi impliziter Bestandteil jeder Modellbildung. Die wesentliche Aufgabe des Modellierers ist es, die relevanten Zusammenhänge und Einflüsse in seinem Modell zu berücksichtigen, es logisch konsistent aufzubauen, so daß es Ergebnisse und Vorhersagen liefert, die mit dem jeweiligen Teil der Wirklichkeit angemessen übereinstimmen (siehe z. B. de D. Ortúzar et al., 1990).

Welche Zusammenhänge relevant sind und in dem Modell beschrieben werden müssen, hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Jede Epoche hat seine eigenen Probleme und seine Fragen an die Modellierer. So interessierte sich vor einem halben Jahrhundert kaum jemand für den Verkehrsfluß an Kreuzungen und die Optimierung der Ampelschaltungen. Stattdessen spielte die Logistik- und Nachschubplanung der Kriegswirtschaft eine Rolle, die ihren Niederschlag schließlich auch in der Straßenverkehrsplanung fand. Heute versucht man dagegen die Verkehrsmengen und den Verkehrsfluß so abzubilden, daß die Schad-

¹ ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Wilckensstr. 3, 69120 Heidelberg

stoffemissionen und die Bildung von Photosmog simuliert werden können – Ergebnis einer veränderten Prioritätensetzung in der Gesellschaft.

Die Realität und die aktuellen Probleme im Verkehrsgeschehen finden also zweifellos in den Verkehrsmodellen und in den entsprechenden Computerprogrammen ihren Niederschlag. Bleibt die umgekehrte Frage: Wie beeinflussen die Modelle die Realität?

Diese Frage erscheint nur auf den ersten Blick absurd. Denn Verkehrsplanungsmodelle werden – wie der Name schon sagt – zum Planen und damit zum Gestalten von Realität eingesetzt. Legen Modelle bestimmte Maßnahmen zur Lösung von Problemen nahe, so werden diese geplant und ggf. umgesetzt, z. B. der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur zur Beseitigung von Verkehrsengpässen. Für die Realität werden dabei jene Wirkungszusammenhänge unterstellt, die bereits im Modell angenommen wurden.

Durch diesen Modellierungs- und Planungszyklus werden Teile der Verkehrswirklichkeit immer mehr dem modellmäßigen Verständnis der Realität angepaßt. Die Modelle finden dadurch sogar weitere Bestätigung, denn sie können die nun veränderte Realität noch besser beschreiben.

Diese These ist natürlich provokativ. Aber sie läßt sich in vielen Einzelfällen belegen. So ist eine wesentliche Prämisse der nutzenökonomischen Modelle zur Beschreibung der Verkehrsmittelwahl der Zeitvorteil der verschiedenen Verkehrsmittel zueinander (siehe z. B. Steierwald, 1994; Baumann, 1984). Stark vereinfacht ausgedrückt: Die Verkehrsteilnehmer bevorzugen jenes Verkehrsmittel, das aufgrund der Geschwindigkeit, der Fahrroute und der erforderlichen Zugangszeiten zu Parkplätzen oder Haltestellen den größten zeitlichen Nutzen verspricht. Auf der Maßnahmensseite führt dies zur Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs mit Vorrangschaltungen, schnellen Stadtbahnen auf eigenen Gleistrassen bis hin zum ICE im Fernverkehr. Tatsächlich steigen einige Verkehrsteilnehmer dann auf den ÖV um, was die Modelle zu bestätigen scheint. Die Beschleunigung der Verkehrsmittel führt jedoch auch zu größeren Aktionsradien und Reiseweiten der Verkehrsteilnehmer, die früher – bei schlechterem Verkehrsangebot – auf bestimmte Ziele schlicht verzichtet hätten. Für die fernen Verkehrsziele wird die weitere Verkürzung der Reisezeit nun aber sehr wünschenswert...

Es wird quasi eine neue Verkehrsrealität „geschaffen“. Attraktive Fußgängerwege oder gut befahrbare Fahrradwege bleiben in der Planung hingegen die Ausnahme, weil sie in den Verkehrsmodellen nicht entsprechend detailliert abgebildet werden. Schon allein aus den Disproportionen des Aufwands, der in die Modellbildung und Computersimulation des Straßenverkehrs und des Öffentlichen Verkehrs im Vergleich zum nichtmotorisierten Verkehr oder zur Verkehrserzeugung gesteckt wird, folgen solche Verschiebungen. Die meisten professionellen Verkehrsplanungsprogramme beschäftigen sich mit der Routenwahl im Straßenverkehr und im Öffentlichen Verkehr, bilden die Angebotsstrukturen detailliert ab, optimieren Ampelschaltungen oder Liniennetzpläne.

Die Nichtexistenz des Fußgängers

Ein fast schon klassisches Beispiel für die begrenzte Wahrnehmung in der Planung ist die Modellierung der Verkehrsmittelwahl: In früheren Verkehrsplanungskonzepten wurde üblicherweise nur der bimodale Split zwischen MIV und ÖPNV angegeben. So interessierte beispielsweise im Generalverkehrsplan (GVP) Heidelberg von 1967 nur der MIV und ÖPNV (siehe Abb. 1). Im folgenden GVP aus dem Jahr 1976 wurde immerhin der Radverkehr mit ausgewiesen. Erst im neuesten Verkehrsentwicklungsplan wurde auch der Fuß-

gängerkehr erhoben und angegeben und brachte erstaunliche Erkenntnisse zutage, nämlich daß die nichtmotorisierte Mobilität in Heidelberg mit durchschnittlich 2 Wegen pro Tag und Person überdurchschnittlich hoch ist (Wermuth, 1990).

Die ausschließliche Orientierung am MIV und ÖPNV war Ausdruck der beschränkten Sichtweise von Planern, aber auch der Gesellschaft insgesamt. Dementsprechend waren die Modelle und Konzepte angelegt, was den Ausbau der Verkehrswege und damit das Verkehrsgeschehen stark beeinflußt hat. Erst heute gehören der Radverkehr und der Fußgängerkehr als fester Bestandteil zum Modal Split und *manchmal* auch zur Verkehrsplanung. In Heidelberg ist die Radverkehrsplanung noch heute unbefriedigend, obwohl 20 % aller Wege mit dem Fahrrad zurückgelegt werden. Aber dieser Planungsmangel wird wenigstens als solcher wahrgenommen.

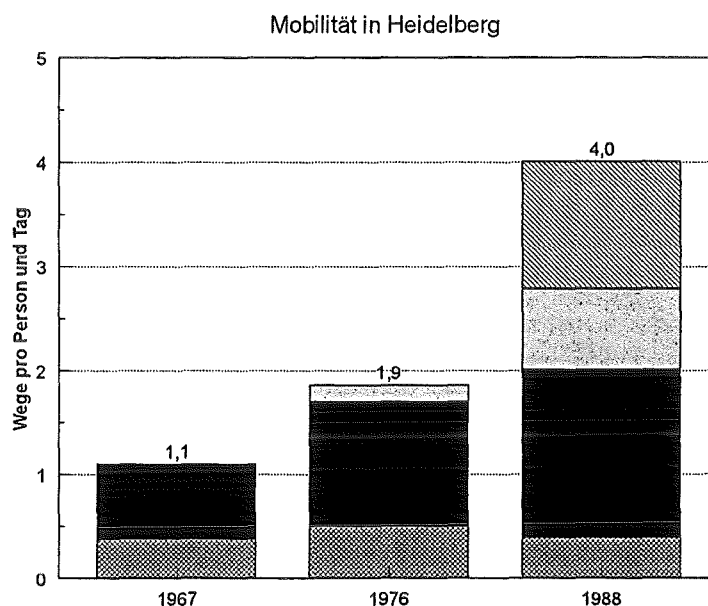


Abb. 1: Ermittelte prozentuale Aufteilung der Verkehrsmittelwahl (Modal Split) in verschiedenen Generalverkehrs- und Verkehrsentwicklungsplänen für die Stadt Heidelberg (Wermuth, 1990).

Probleme bei der Modellvereinfachung

In einem soliden naturwissenschaftlichen Modell werden meistens Angaben über den Gültigkeitsbereich der Modelle gefordert: Welche Aussagen können damit noch getroffen werden, welche nicht? In der Verkehrsplanung verschwimmen solche Anforderungen. Besonders unangenehm ist die mangelnde Reflexion von Modellbeschränkungen, Vereinfachungen oder Annahmen und deren Auswirkungen auf Ergebnisse.

Ein prominentes Beispiel dafür ist die Personenverkehrsprognose zum Bundesverkehrswegeplan (ITP/IVT, 1991). Der Bundesverkehrswegeplan regelt den mittelfristigen Ausbau der Fernverkehrsinfrastruktur durch die Bundesregierung. Hierzu werden szenarienhaft im Sinne von Bedarfsprognosen Verkehrsmengen für die Zukunft berechnet. Folgende Fälle wurden in der letzten Prognose im wesentlichen unterschieden:

- **Bezugsfall 1988**

Es handelt sich um die Verkehrsmengen im Status Quo.

- **Szenario F 2010**

Es werden für 2010 die ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und Kosten für Verkehrsteilnehmer wie heute unterstellt.

- **Szenario G 2010**

Es werden gezielte ordnungspolitische Maßnahmen zur Dämpfung des Wachstums für den Straßen- und Luftverkehr unterstellt.

- **Szenario H 2010**

Es werden nur die aktuellen Trends bei der Entwicklung der Kosten für Verkehrsteilnehmer und kommunalpolitisch motivierten Restriktionen des Straßenverkehrs berücksichtigt.

Insbesondere wird bei Szenario G angenommen, daß sich die Pkw-Nutzerkosten verdoppeln, verstärkte Parkraumrestriktionen eingeführt werden und die Geschwindigkeit im Straßennetz insgesamt sinkt.

Für alle Szenarien werden bestimmte Annahmen konstant gehalten, die sogenannten szenariounabhängige Faktoren oder exogenen Faktoren. In erster Linie handelt es sich dabei um die soziodemographische und sozioökonomische Entwicklung, wie sie für Deutschland zum Jahr 2010 prognostiziert wird. Dies ist unproblematisch und für einen Szenariovergleich ceteris paribus sogar sinnvoll. Allerdings werden noch weitere Größen in den Szenarien konstant gehalten:

- das Verkehrsangebot im Fernverkehr (z. B. durch das Straßen- oder Schienennetz),
- die Motorisierung und Pkw-Verfügbarkeit der Bevölkerung, ausgedrückt in Pkw pro 1000 Einwohner (583 im Jahr 2010),
- die Entwicklung der Freizeit der Verkehrsteilnehmer.

In diesen drei Bereichen wird also angenommen, daß sie unabhängig von den sonstigen Szenarioannahmen und den Szenarioergebnissen sind und von der Szenariorechnung separiert werden können.

Auf die Schwierigkeit dieser Annahmen weist die Prognose teilweise selbst hin. So muß davon ausgegangen werden, daß Mobilitätswachse sich auch als Folge von Verbesserungen des Verkehrsangebotes ergeben; Beispiel dafür ist der TGV-Südost in Frankreich (ITP/IVT, 1991, S. 68). Damit existiert jedoch ein komplexer Ringschluß, wenn die Prognosen als Basis für den Ausbau des Fernverkehrsnetzes genutzt werden sollen.

Noch gravierender sind die Annahmen zur Motorisierung. So beeinflußt die Pkw-Verfügbarkeit ganz wesentlich die Mobilitätsmuster und die Verkehrsmittelwahl der Verkehrsteilnehmer (vgl. DIW, 1993). Das Ergebnis der Prognose wird durch eine solche exogene Größe fast schon determiniert. Denn besitzt ein Verkehrsteilnehmer ein Pkw, so sind Kostenvorteile oder Angebotsverbesserungen des ÖPNV aufgrund der fixen MIV-Kosten für die Verkehrsmittelwahl zweitrangig. Das Szenario G beinhaltet als wesentliche Maßnahme die Steigerung der Pkw-Nutzerkosten. Diese müßte sich hauptsächlich auf den Pkw-Kauf und auf eine geringere Steigerung der Motorisierung gegenüber den anderen Szenarien auswirken und damit mittelbar auch auf veränderte Mobilitätsmuster und die Verkehrsmittelwahl. Genau dieser Haupteffekt bleibt bei der Modellierung der Verkehrsmengen durch einen konstanten Motorisierungsgrad jedoch ausgespart.

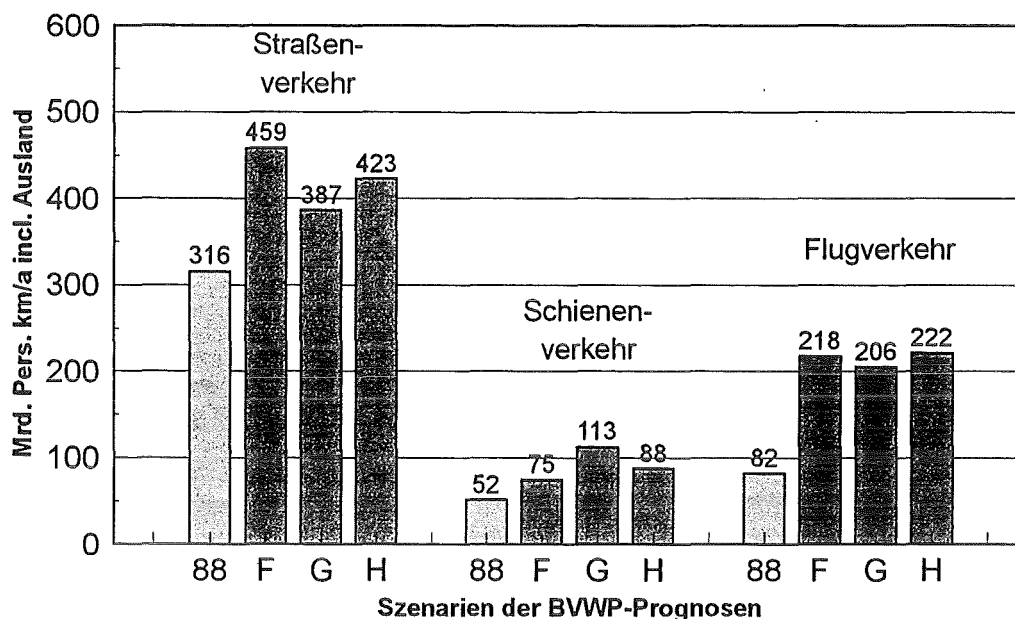


Abb. 2: Prognosen der Bundesverkehrswegeplanung zum Personenverkehr in Deutschland (ITP/IVT, 1991).

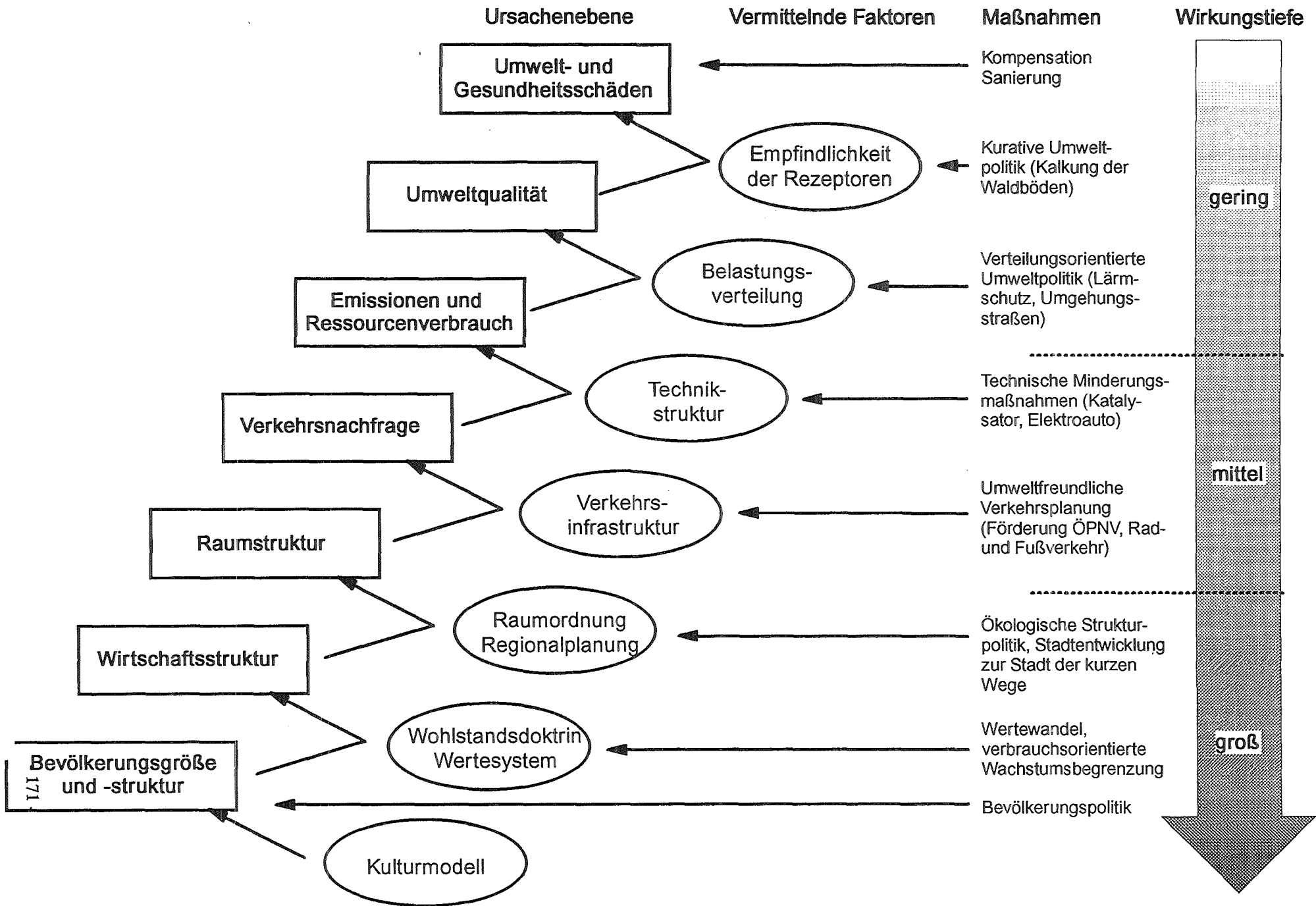
So ist es nicht verwunderlich, daß die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien nur marginale Abweichungen zeigen (siehe Abb. 2). Aufgrund der gleichermaßen steigenden Motorisierung (neben anderen Annahmen) nimmt der Straßenverkehr in allen Szenarien gegenüber dem Status Quo stark zu. Sogar in Szenario G wird ein Zuwachs von über 22 % errechnet.

Die wichtigere Frage wäre jedoch, ob durch die drastischen Maßnahmen in Szenario G nicht auch Größen beeinflusst werden können, die im Modell als exogen angenommen wurden, aber wesentlich über den Zuwachs des Verkehrs bestimmen.

Wirkungstiefe von Maßnahmen und Handlungskonzepten

Maßnahmen im Verkehrsbereich, aber auch allgemein im Umweltschutz, können an unterschiedlichen Ebenen ansetzen, wie bereits das Beispiel der Pkw-Verfügbarkeit gezeigt hat. Sie können einerseits an den Symptomen ansetzen, um die augenscheinlichen Umweltbelastungen zu verringern oder zu verteilen (Katalysatoren, Umgehungsstraßen, passive Lärmschutzmaßnahmen, ...), ohne an den eigentlichen Ursachen, nämlich der Notwendigkeit, von A nach B zu gelangen, etwas zu verändern. Im Umweltschutz werden derartige Maßnahmen oft als end-of-the-pipe-Maßnahmen bezeichnet. Andererseits können Maßnahmen auch an den eigentlichen Ursachen der Probleme ansetzen, z.B. an dem aus der Siedlungsstruktur resultierenden Mobilitätsbedarf oder am Umwelt- und Verkehrsbewußtsein der Individuen (Wertewandel).

Abb. 3 (nächste Seite): Das schematische Stufenmodell der Wirkungstiefe am Beispiel der Umweltauswirkungen durch Verkehr.



6. Treffen des ARK „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umweltnutzungen“

In Klimaschutzkonzepten wurde zur Beschreibung dieses Aspektes die *Wirkungstiefe* eingeführt (Schmidt et al., 1992; Prittwitz, 1990). Sie ist gering bei Maßnahmen der Gefahrenabwehr und Symptombekämpfung, mittel bei Maßnahmen der technischen Vorsorge und groß bei strukturellen Maßnahmen und beim Wertewandel. Je tiefer eine Maßnahme ansetzt, desto größer ist die Wirkungstiefe, desto mehr werden die eigentlichen Ursachen tangiert. Da die Kopplungen zwischen den verschiedenen Stufen nur schwer quantifizierbar sind, lassen sich die Wirkungen solcher Maßnahmen jedoch meist nur qualitativ beschreiben oder schätzen. Maßnahmen geringer Wirkungstiefe können dagegen gut quantifiziert werden.

Die *Wirkungszeit*, also bis eine Maßnahme greift, verläuft tendenziell gegenläufig zur Wirkungstiefe. Die Wirkung der Maßnahme muß sich quasi über alle Stufen des Modells „von unten nach oben“ fortpflanzen, bevor positive Umwelteffekte festgestellt werden können. Umwelthandeln, das an kurzfristigen Erfolgen orientiert ist, insbesondere unter dem Diktat der politischen Wahlzyklen, wird deshalb üblicherweise an den Maßnahmen geringer oder mittlerer Wirkungstiefe ansetzen. Die Erfolge werden allerdings nicht von längerer Dauer sein, da die zugrundeliegenden Strukturen nicht verändert wurden.

Im Verkehrsbereich äußert sich das darin, daß zwar ausführlich über die Änderung und Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur diskutiert und geplant wird. Dies betrifft einen überschaubaren Zeitraum von ca. 10 bis 15 Jahren. Nur selten wird jedoch darüber nachgedacht, welchen Einfluß die Siedlungsstruktur auf den Verkehr hat. Maßnahmen in diesem Bereich zeigen ihre Wirkung oft erst viele Jahrzehnte nach der Planung. Heute sind in Westdeutschland u. a. die Einfamilienhaussiedlungen aus den 50er und 60er Jahren mit ihrem großen Flächenbedarf und ihrer geringen Besiedlungsdichte ein Problem für jede ökonomisch vertretbare ÖPNV-Erschließung.

Verkehrsplanungsmodelle und die Verkehrsplanung allgemein setzen heutzutage überwiegend im Bereich der mittleren Wirkungstiefe an. Hier werden Maßnahmen politisch gefordert, z. B. der Infrastrukturausbau, hier lassen sich die Maßnahmen und Wirkungen noch modellmäßig beschreiben und quantifizieren. Einflüsse aus den darunter liegenden Ebenen werden mittels exogener Größen oder fester Randbedingungen meistens als konstant angenommen und entziehen sich damit der Modellbildung.

Notwendig wird jedoch gerade die Berücksichtigung der tieferliegenden Ursachenebenen. Hierzu gehören nicht nur die Einflüsse der Raumstruktur, sondern auch soziale und wirtschaftliche Rahmenbedingungen, die wesentlich den Verkehr, und damit auch die Umweltauswirkungen des Verkehrs, beeinflussen.

Die Zukunftsaufgabe „Verkehrsvermeidung“

Eine solche tieferreichende Planungsstrategie kann als Verkehrsvermeidung bezeichnet werden. Schon in den 70er Jahren hatte der Verkehrsökonom Michael Thomson geschrieben: „Verkehrsvermeidung verringert die Verkehrsnachfrage, indem die zu ihrer Entstehung führenden Bedingungen vermieden werden“ (Thomson, 1978).

Das Problem der Verkehrsvermeidung ist, daß sie den eigentlichen Bereich der Verkehrsplanung verlassen und vorrangig in anderen Bereichen ansetzen müßte: in der Raumplanung, in der Stadt- und Regionalentwicklungsplanung, in der Wirtschaftsförderung, in der Sozialpolitik. In diesen Ressorts müßte im Vorfeld von Entscheidungen geprüft werden, wie sie auf Verkehr wirken, ob eine zusätzliche Verkehrserzeugung daraus resultiert oder ob sie verkehrsvermeidend wirken. Zur Operationalisierung solcher Strategien gibt es ähnlich der

Umweltverträglichkeitsprüfung erste Ansätze (ifeu, 1995). Sie sind allerdings noch qualitativen Charakters und schaffen es nicht, die komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Ursachen-Wirkungsstufen, auch nur teilweise, quantitativ abzubilden.

Das Beispiel des Vierstufenalgorithmus in der Verkehrsplanung

Als konkretes Beispiel der quantitativen Modellierung und der softwareseitigen Umsetzung soll der sogenannte Vierstufenalgorithmus vorgestellt werden. Er ist ein häufig verwendetes Modell in der Verkehrsplanung und ermöglicht einige interessante quantitative Beschreibungen des Verkehrsgeschehens, zeigt jedoch auch Mängel bei der Modellierung vorgelegter Determinanten.

Das Verkehrsmodell wird in vier Stufen separiert, in denen jeweils eigene Teilmodelle zum Einsatz kommen, die dann aber auch wieder über Rückkopplungsschleifen miteinander verknüpft werden können. Es wird unterschieden:

- **Verkehrserzeugung**

In einem Quellgebiet (z. B. einem Stadtteil) entstehen aufgrund der speziellen Bevölkerungszusammensetzung und deren Mobilitätsbedürfnisse eine bestimmte Anzahl von Quelfahrten zu den jeweiligen Verkehrszwecken.

- **Verkehrszielwahl**

Je nach Raumangebot (Arbeitsplätze, Einkaufs- und Freizeitmöglichkeiten, etc.) werden Ziele für diese Fahrten gesucht. Näherliegende oder leichter zu erreichende Angebote werden dabei bevorzugt.

- **Verkehrsmittelwahl**

Für die jeweiligen Relationen zwischen der Quelle und dem Ziel werden die Verkehrsangebote geprüft und mit einem nutzenökonomischen Modell die Verkehrsmittelwahl errechnet. Entscheidend ist dabei z. B. der Zeitbedarf der verschiedenen Verkehrsmittel auf den Relationen.

- **Fahrroutenwahl**

Ist das Verkehrsmittel bekannt, wird die konkrete Fahrroute im Netz (Straßennetz oder ÖPNV-Liniennetz) unter Berücksichtigung des konkreten Angebotes und der sich aus der Nachfrage ergebenden Belastungen (Stausituationen) bestimmt.

Diese vier Stufen sind in Abb. 4 schematisch dargestellt. F ist dabei die Fahrtenmatrix mit den entsprechenden Ausprägungen der einzelnen Stufen. Nach der Routenwahl können für die einzelnen Netzabschnitte die Fahrten F_{ijm} addiert und die Verkehrsstärken (z. B. Kfz pro Tag einer bestimmten Straße) angegeben werden.

Das Verkehrsangebot und die gewählte Fahrroute beeinflussen natürlich auch die Verkehrsmittelwahl und die Verkehrszielwahl, bei der im wesentlichen der Zeitbedarf eingeht. Hier ist also eine Rückkopplung erforderlich, die man meistens iterativ zu lösen versucht. Gerade in dieser Rückkopplung spielen sich die Wechselwirkungen zwischen dem Entstehen von Neuverkehr aufgrund attraktiver und gut erreichbarer Raumangebote und der Verkehrsinfrastruktur ab. Wird z. B. eine neue Straße gebaut, so werden bestimmte Ziele leichter mit dem Auto erreichbar; es erfolgt eine Verlagerung des Verkehrs von anderen Zielen auf das neue Ziel; und es erfolgt ggf. eine Verkehrsmittelverlagerung.

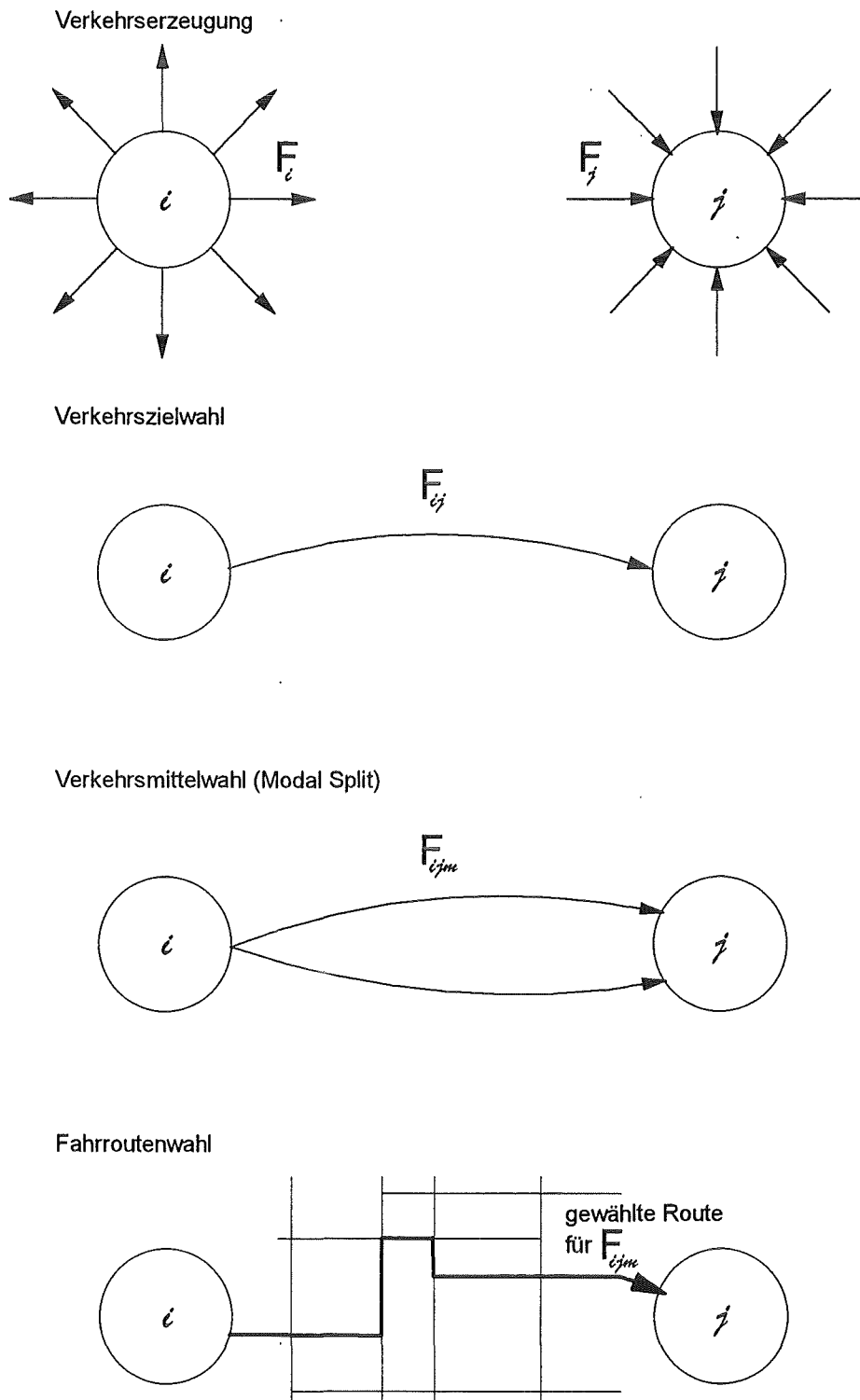


Abb.4: Schematische Darstellung des Vierstufenalgorithmus in der Verkehrsplanung. F_{ijm} ist die Fahrtenmatrix mit der Anzahl der Fahrten pro Zeit.

Ein konkretes Beispiel für ein solches Modell ist das Programmpaket VISEM/VISUM der Ingenieurgesellschaft PTV in Karlsruhe. Die Teilmodelle mit den verschiedenen Eingangsgrößen und rückgekoppelten Größen sind in Abb. 5 vereinfacht dargestellt. Das Modell ermöglicht grundsätzlich die angesprochenen Rückkopplungen. Damit kann nicht nur der

Einfluß der Angebotsveränderungen für verschiedenen Verkehrsmittel auf den Modal Split, sondern auch auf die Zielwahl berücksichtigt werden.

In der Praxis ist eine solche Berücksichtigung allerdings sehr umständlich, da der gesamte Bereich der Verkehrsnachfrageberechnung in einer Software (VISEM) und der Bereich der Verkehrsangebotsberechnung in einer anderen Software (VISUM, zusätzlich unterschieden nach ÖPNV und MIV) abgedeckt wird. Die Rückkopplung muß mittels Auslesen und Einlesen der F_{ijm} -Matrizen erfolgen, was verhältnismäßig aufwendig ist.

Viele Anwender errechnen deshalb nur einmalig die Verkehrsnachfrage mit der Software VISEM bzw. schätzen sie sogar ab und spielen dann verschiedene Netzfälle mit der Angebotssoftware VISUM durch. Die Rückkopplungen bleiben dabei vernachlässigt.

Dies äußert sich auch in der Anwendernachfrage und Weiterentwicklung der verschiedenen Programmpakete. Die Angebotssoftware VISUM ist mittlerweile sehr anwenderfreundlich gestaltet, produziert anschauliche graphische Darstellungen der Netzbelastungen und erfreut sich großer Popularität bei Verkehrsplanern in Planungsbüros und Verkehrsbetrieben oder Verwaltungen. Die Nachfragesoftware VISEM ist verhältnismäßig abstrakt in der Anwendung und erfordert einiges an Fachkenntnis. Es wundert deshalb nicht, daß Maßnahmen aus dem Bereich der Verkehrsvermeidung selbst in der methodisch fortgeschrittenen Verkehrsplanung nur selten aufgegriffen werden.

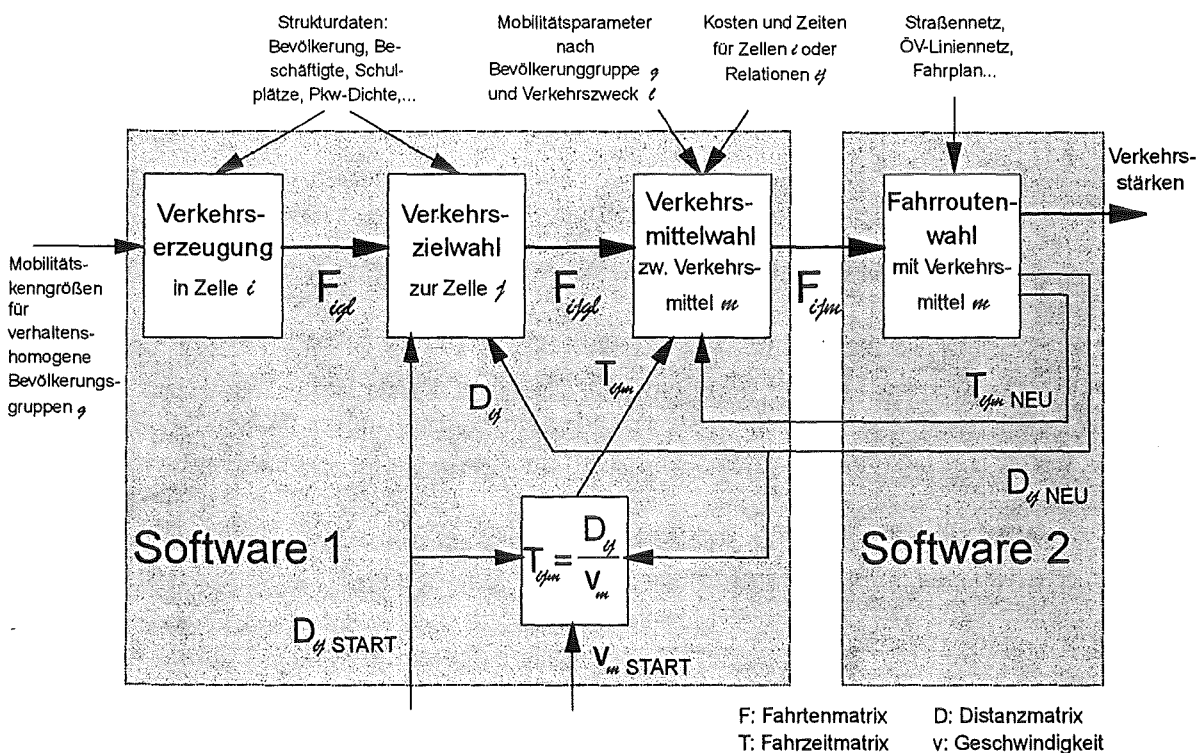


Abb. 5: Vierstufenalgorithmus eines konkreten Software-Pakets mit der Rückkopplung der Fahrzeiten oder Fahrstrecken zwischen den einzelnen Stufen. Bei der Verkehrserzeugung wird noch zusätzlich nach den Verkehrsteilnehmern (in sogenannten verhaltenshomogenen Gruppen) und dem Verkehrszweck unterschieden.

Ein weiterer Nachteil dieses Modells ist, daß die Mobilitätsmuster der Bevölkerung exogene Größen sind, d.h. sie müssen von außen eingegeben werden. Mit dem Modell kann beispielsweise nicht errechnet werden, welchen Einfluß ein verändertes Verkehrsangebot auf

die Motorisierung der Bevölkerung oder auf die Wahl bestimmter Wegeketten hat. Diese Vernachlässigung kann allerdings nicht allein dem Modell angelastet werden, da hierzu auch die Erfahrungen und die empirische Absicherung der quantitativen Abhängigkeiten im wesentlichen fehlen.

Schlußfolgerungen

Die Verwendung solcher Modelle zur Untersuchung verkehrsvermeidender Strategien ist deshalb begrenzt. Die Software müßte zumindest in den Bereichen, in denen quantitative Aussagen zur Verkehrsvermeidung möglich wären, z. B. zur veränderten Zielwahl, komfortabler gestaltet werden und dem Anwender die Scheu vor der Modellierung solcher komplexen Sachverhalte nehmen. Für die Berücksichtigung weiterer Abhängigkeiten, gerade auch zu wirtschaftlichen und sozialen Einflußfaktoren, wären jedoch völlig neue Modelle und – nicht zu vernachlässigen – ihre empirische Fundierung erforderlich.

Den Modellierern muß bewußt sein, welche politischen und planerischen Entscheidungen durch bestimmte Modellbildungen determiniert werden und welche Verantwortung sie damit tragen. Ihnen kommt die Aufgabe zu, die Problemlage in der Realität kritisch zu reflektieren, bisherige Modellierungs- oder Lösungsansätze in Frage zu stellen, dies auch den Entscheidungsträgern gegenüber zu verdeutlichen und neue Ansätze auszuprobieren.

Quellen

Baumann, J. H. (1984): Verkehrsmodelle. Grundlagen und Methoden. Geomod Heft 3. Universität Bremen

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW (1993): Vergleichende Auswertungen von Haushaltsbefragungen zum Personennahverkehr (KONTIV 1976, 1982, 1989). Berlin.

ifeu (1995): Falluntersuchungen für Verkehrsauswirkungsprüfungen (VAP) im Gesetzgebungs- und Ordnungsverfahren des Bundes. Im Auftrag des Bundesverkehrsministerium. Heidelberg

Intraplan Consult GmbH/Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V. ITP/IVT (1991): Personenverkehrsprognose 2010 für Deutschland. Schlußbericht. Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr. München/Heilbronn

de D. Ortúzar, J. und L. G. Willumsen (1990): Modelling Transport. Wiley & Sons.

Schmidt, M. (1994): Integrierte Verkehrsplanungsansätze im Rahmen von kommunalen Emissionsminderungs- und Klimaschutzkonzepten. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Verkehrskonzepte für Ballungsräume. Düsseldorf. S. 61-74

Schmidt, M. und I. Hetzel (1995): Die Modellierung von Straßenverkehrsmengen und Schadstoffemissionen für kommunale Klimaschutzkonzepte. In: Kremers, H. et al. (Hrsg.): Raum und Zeit in Umweltinformationssystemen. Teil II. Marburg. S. 610-617

Steierwald, G. und Künne, H.-D. (1994): Stadtverkehrsplanung. Heidelberg/Berlin

Thomson, J. M. (1978): Grundlagen der Verkehrspolitik. Bern/Stuttgart

Wermuth, M. et al. (1990): Verkehrseentwicklungsplan Heidelberg. 1. Zwischenbericht. Braunschweig

**13 Ökologische Bewertung von Gütertransporten
und deren Anwendung in der
Konsumgüterdistribution.**

Kraus, St.



Ökologische Bewertung von Gütertransporten und deren Anwendung in der Konsumgüterdistribution

Vortrag zum Workshop des
Arbeitskreises 5 der GI Fachgruppe 4.6.1
“Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen”
Magdeburg, 13.03. - 15.03.1996

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Kraus

Universität Augsburg
Lehrstuhl für Produktion und Logistik

Gliederung

1. Einleitung
2. - Bewertungsmodell
- 2.1 Ökologische Bewertungsgrößen
- 2.2 Modellierung von Energie-, Kraftstoffverbrauch und Emissionen
3. Fallstudie in der Konsumgüterdistribution
4. Ausblick



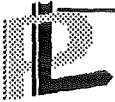
1. Einleitung

In den vergangenen 10 Jahren zeichnete sich drastisches Anwachsen des Straßengüterverkehrs in Deutschland ab. Werden die amtlichen Statistiken analysiert, so ist eine Zunahme der Fahrleistung [km] um ca. 41 % in diesem Zeitraum zu beobachten; gleichermaßen stieg die Verkehrsleistung [tkm] um ca. 61 % [7]. Diese Entwicklung zeigt die wachsende ökologische Belastung der Umwelt durch den Güterverkehr auf, die in der Vergangenheit zu einer zunehmenden Sensibilisierung der Bevölkerung geführt hat. Aus Sicht der Verlagerer und des Straßengüterverkehrsgewerbes birgt das Anwachsen des Verkehrs u.a. negative Effekte auf operativ-transportlogistischer Ebene, wie z.B. Verkehrsstaus und erhöhte Unfallgefahr. Darüber hinaus wird von politischer Seite zunehmend Druck erkennbar, der zu negativen Effekten auf ökonomischer Ebene für das Transportgewerbe, z.B. Einführung von Straßennutzungsgebühren oder erhöhte steuerliche Belastungen, führen könnte. Eine Schätzung zeigt, daß mehr als ca. 50 % der Fahrleistung des Straßengüterverkehrs in Deutschland durch die Distribution von Konsumgütern erzeugt wird [6]. Dies verdeutlicht das Einflußpotential der Konsumgüterbranche auf den Güterverkehr. Zahlreiche Studien in der Konsumgüterindustrie haben gezeigt, daß die Gestaltung des Distributionsnetzes maßgeblichen Einfluß auf die Höhe des zum Transport der Waren erforderlichen Güterverkehrs hat. In der jüngeren Vergangenheit konnten in der Konsumgüterbranche verschiedene Trends und Entwicklungen verzeichnet werden, wie z.B. Bestandskonzentration durch Reduzierung der Lageranzahl und Umschlagpunkt-Konzepte [12], die zu einer Verringerung der Distributionskosten, jedoch oftmals zu einer Erhöhung der Verkehre, gemessen an der Fahrleistung, führten. In bisherigen Untersuchungen wurden zwar Kostenwirkungen bei Strukturveränderungen von Distributionsnetzen, nicht aber damit verbundene Umweltwirkungen detailliert betrachtet. Ziel der Untersuchung ist, ein Modell zur ökologischen Bewertung des Güterverkehrs in Distributionsnetzen zu erstellen. Hierdurch sollen strukturabhängige Umweltwirkungen von Distributionsnetzen quantifiziert werden, um eine Basis zur Versachlichung der Diskussion des Güterverkehrs unter ökologischen Aspekten bereitzustellen. Die Betrachtung erfolgt dabei disaggregiert und unternehmensbezogen auf einzelwirtschaftlicher Ebene. In Kapitel 2 wird zunächst die Methodik eines Bewertungsmodells vorgestellt, daß transportbedingte Umweltwirkungen der Verkehrsträger LKW, Bahn und Binnenschiff anhand verschiedener Meßgrößen quantifiziert. Dieses Modell wurde in ein Softwaresystem zur Planung strategischer Distributionsstrukturen implementiert. Kapitel 3 zeigt erste Rechenergebnisse anhand der Fallstudie eines Konsumgüterherstellers auf. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf weitere Untersuchungen im Rahmen des beschriebenen Forschungsvorhabens.

2. Ökologisches Bewertungsmodell

2.1 Ökologische Bewertungsgrößen

Das vorgestellte Modell nutzt verschiedene Meßgrößen (Fahrleistung, Verkehrsleistung, Primärenergieverbrauch, Kraftstoffverbrauch und Emissionen) zur ökologischen Bewertung von Gütertransporten (vgl. Tabelle 1). Die Fahrleistung bezeichnet hierbei die Summe der zurückgelegten



Transportkilometer innerhalb einer bestimmten Periode. Die Transportleistung ergibt sich aus dem Produkt des Frachtgewichtes und der jeweils zurückgelegten Transportentfernung. Wird berücksichtigt, daß auf einem Verkehrsnetz mit einer vorgegebenen Kapazität die Verkehrsdichte und somit negative Umwelteffekte, wie z.B. die Wahrscheinlichkeit von Verkehrsstaus oder Unfällen, mit der aufgebrachten Fahr- und Transportleistung zunehmen, so können diese Umweltkenngößen zur Beschreibung der Belastung der Verkehrsinfrastruktur herangezogen werden.

KenngroÙe	MaÙeinheit	Umweltwirkung
Fahrleistung	km	Belastung der Verkehrsinfrastruktur
Transportleistung	tkm	
Primärenergieverbrauch	kWh, kJ	Ressourcenverbrauch
Kraftstoffverbrauch	l, kg	
Emissionen	kg, dB, u.a.	Schädigende Wirkung auf Mensch, natürliche Umwelt und Materialien

Tabelle 1: UmweltkenngroÙen

Hinsichtlich des Energieverbrauchs ist beim Transport zwischen dem Primär- und dem Endenergieverbrauch zu unterscheiden. Mit der Primärenergie wird der Energieinhalt der natürlichen Energieträger, wie z.B. Erdöl, Kohle oder Erdgas, bezeichnet. Ausgehend von dem Primärenergieträger wird unter Zusatz weiterer Energie ein sogenannter Sekundärenergieträger, der im Rahmen der Bewertung von Transporten auch als Endenergieträger zu bezeichnen ist, gewonnen. Die Endenergie steht den jeweiligen Verbrauchern (hier: die Transportmittel) zur Nutzung bereit. Für den Transport relevante Endenergieträger sind im betrachteten Fall der Dieselkraftstoff und der Strom. Die Herstellung dieser Energieträger ist unterschiedlich verlustbehaftet [21, 25]. Werden verschiedene Transportmittel, die unterschiedliche Arten von Endenergieträgern nutzen, wie z.B. LKW und elektrifizierte Bahn, gegenübergestellt, so ist aus Gründen der Vergleichbarkeit der Primärenergieverbrauch zur Bewertung heranzuziehen. Da die Primärenergieträger aus natürlichen Ressourcen gewonnen werden, können Primärenergieverbrauch und der Kraftstoffverbrauch (nur beim StraÙengüter- und Binnenschifftransport) als MeÙgroÙen zur Beschreibung des Ressourcenverbrauchs herangezogen werden.

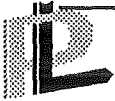
Darüber hinaus können Emissionen, die beim TransportprozeÙ entstehen, quantifiziert werden. Die Emissionen stellen beim Güterverkehr einen wesentlichen Belastungsfaktor für die Umwelt dar, daher soll im folgenden etwas ausführlicher hierauf eingegangen werden. Emissionen werden nach ihrer Entstehung über eine bestimmte Entfernung transportiert (Transmission) und wirken dann als Immission auf den menschlichen Organismus, die natürliche Umwelt (z.B. Atmosphäre, Wasser, Boden) und Materialien (z.B. Baumaterialien) ein. Emissionen können hinsichtlich ihrer Entstehungsquelle in direkte und indirekte Emissionen unterschieden werden (vgl. Tabelle 2). Direkte Emissionen entstehen unmittelbar beim TransportprozeÙ, wenn die bereitgestellte Endenergie in Bewegungsenergie umgesetzt wird. Ein Beispiel bildet die Kraftstoffverbrennung im Dieselmotor. Indirekte Emissionen umfassen sämtliche Emissionen,

die unabhängig vom Transportvorgang entstehen [24]. Sie umfassen auch die in der Vorkette bei Umwandlung des Primärenergieträgers (z.B. Kohle, Rohöl) in den Endenergieträger (z.B. Strom, Dieselkraftstoff) erzeugten Emissionen. Werden Transportmittel gegenübergestellt, die unterschiedliche Primärenergieträger nutzen, so sind im Rahmen eines sinnvollen Vergleichs immer direkte und indirekte Emissionen zu betrachten. Hinsichtlich des stofflichen Charakters können Emissionen nach stofflichen und nicht stofflichen Emissionen differenziert werden. Den stofflichen Emissionen sind die bei der Energieumwandlung entstehenden Abgase, Verdunstungsemissionen und sonstige feste Stoffe zuzurechnen. Im Rahmen der betrachteten Transportprozesse stellen die Abgasemissionen die aus ökologischer Sicht wesentliche Emittentengruppe der stofflichen Emissionen dar. Sie entstehen durch die Verbrennung fossiler Energieträger. Für den Güterverkehr relevante Abgasemissionen enthalten überwiegend gasförmige Stoffe, wie Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂) und Kohlenwasserstoffe (H_yC_z). Darüber hinaus sind u.a. feste Partikel, auch als Staub oder Ruß bezeichnet, in den Abgasen enthalten, die einen kohlenstoffhaltigen Kern besitzen [8, 2]. Verdunstungsemissionen entstehen bei Kraftfahrzeugen im wesentlichen durch Verflüchtigung des Kraftstoffes aus Tank und Motor, wobei überwiegend organische Kohlenwasserstoffmoleküle (H_yC_z) emittiert werden [9]. Neben gasförmigen Emissionen entstehen durch den Betrieb der Transportmittel noch Emissionen fester Stoffe. Hierzu zählen u.a. Reifenabrieb und Bremsstaub, sowie Tropfverluste des Fahrzeugs jeder Art [1]. Im Rahmen der Emissionen mit nicht stofflichem Charakter sind Geräuschemissionen und Erschütterungen zu unterscheiden. Geräuschemissionen entstehen u.a. durch den Motorbetrieb sowie Windgeräusche, welche durch die aerodynamische Gestaltung des Fahrzeugs geprägt werden [24].

Quelle		stofflicher Charakter	
direkte Emissionen	indirekte Emissionen	stofflich	Abgasemission
			Verdunstungsemission
			sonstige feste Stoffe
		nicht stofflich	Geräuschemission
Erschütterungen			

Tabelle 2: Emissionen

Das vorgestellte Modell berücksichtigt indirekte und direkte Abgasemissionen (CO, CO₂, NO_x, SO₂, H_yC_z, Partikel). In Abhängigkeit der Konzentration und der Einwirkungsdauer üben diese Emissionen eine schädigende Wirkung auf den menschlichen Organismus (z.B. karzinogene Wirkung), die natürliche Umwelt (z.B. Versauerung der Böden, Smog) und Materialien (z.B. Korrosion) aus. Für eine ausführliche Darstellung der Emissionswirkungen sei auf die Literatur verwiesen [24, 1, 2, 22].



2.2 Modellierung von Emissionen, Kraftstoff- und Energieverbrauch

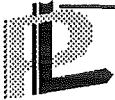
Die Umweltkenngrößen Fahrleistung und Transportleistung (vgl. Tabelle 1) können in einem Transportnetzwerk direkt bestimmt werden, falls die zu transportierende Menge und die Transportentfernungen bekannt sind. Emissionen, Kraftstoff- und Energieverbrauch sind von einer Fülle weiterer Einflußgrößen, die u.a. technologisch geprägt sind, abhängig. Eine detaillierte Berücksichtigung sämtlicher Einflußgrößen erscheint aufgrund der Komplexität unmöglich und auch nicht sinnvoll, da im Rahmen einer Planung die hierzu erforderliche Informationsbasis i.d.R. unvollständig ist. Daher sind operable Modelle zu erstellen, die von bestimmten Vereinfachungen ausgehen. Im folgenden wird die Modellbildung zur Ermittlung der angesprochenen Umweltkenngrößen, unterschieden nach den betrachtenden Verkehrsträgern im Güterverkehr (LKW, Bahn, Binnenschiff), vorgestellt.

LKW-Transport

Im Rahmen der Untersuchung des LKW-Transports wird von folgenden verbrauchs- und emissionsbestimmenden Einflußgrößen ausgegangen [15]: Fahrzeugeigenschaften, Fahrgeschwindigkeit, Transportentfernung, Zuladung, individuelles Fahrverhalten (vgl. Tabelle 3).

Die für den Kraftstoff-, Energieverbrauch und die Emissionen relevanten Fahrzeugeigenschaften ergeben sich überwiegend aus der Leistung und technischen Ausgestaltung des Fahrzeugmotors mit seinen Aggregaten, dem Fahrzeugleergewicht, dem Fahrwiderstand, dem Energiebedarf der Nebenaggregate (z.B. Laderaumklimatisierung) und dem Wartungszustand des Fahrzeugs. Untersuchungen des LKW-Fahrzeugbestandes zeigen, daß die meisten dieser verbrauchs- und emissionsrelevanten Fahrzeugeigenschaften wesentlich mit der Höhe zulässigen Zuladung bzw. mit dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeugs korreliert sind [4]. Daher wird im betrachteten Modell das zulässige Fahrzeuggesamtgewicht als ein Parameter zur Modellierung der verbrauchs- und emissionsbestimmenden Fahrzeugeigenschaften betrachtet.

Die Fahrgeschwindigkeit wird im wesentlichen durch zwei unterschiedliche Faktoren beeinflusst, wobei streckenspezifische und verkehrsspezifische Einflußfaktoren zu unterscheiden sind. Streckenspezifische Faktoren mit Einfluß auf die Geschwindigkeit sind im wesentlichen der zum Transport genutzte Straßentyp, die Topographie des Fahrweges und die Verkehrsführung [5]. Als wichtiger verkehrsspezifischer Einflußfaktor ist die Verkehrsdichte anzusehen. Tendenziell ist zu beobachten, daß mit steigender Verkehrsdichte der Verkehrsfluß zunehmend gehemmt und somit die mögliche Durchschnittsgeschwindigkeit gesenkt wird, was bis zum Verkehrsstillstand (Stau) führen kann. Grundsätzlich gehen wir in unserer Untersuchung davon aus, daß ein Fahrzeug auf dem zurückzulegenden Transportweg unterschiedliche Straßenkategorien nutzt [24]. Der Mix dieser Straßenkategorien ist i.d.R. abhängig von der Transportentfernung. Grundsätzlich ist zu beobachten, daß mit zunehmender Transportentfernung in steigendem Maße Straßentypen genutzt werden, wie z.B. Autobahnen, die eine hohe Fahrgeschwindigkeit zulassen. Vor diesem Hintergrund werden im vorgestellten Modell entfernungsabhängige Fahrgeschwindigkeiten berücksichtigt. Darüber hinaus ist die geschwindigkeitsbestimmende Verkehrsdichte typischer Weise von der Gemeindegröße abhängig. Im



Modell wird daher die Fahrgeschwindigkeit als Funktion der Größe der Gemeinde betrachtet, innerhalb derer der Transport stattfindet. Hierbei wird mit zunehmender Gemeindegröße eine abnehmende mittlere Fahrgeschwindigkeit unterstellt.

Energie-, Kraftstoffverbrauch und Emissionen verhalten sich, wenn das Kaltstartverhalten des Fahrzeugs vernachlässigt wird, näherungsweise proportional zur zurückgelegten Transportentfernung [9]. Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage für eine Verbrauchs- und Emissionsbestimmung mit Parametern, die spezifisch zur Fahrleistung in Ansatz gebracht werden.

Mit zunehmender Fahrzeugzuladung wachsen Kraftstoffverbrauch und Emissionen je zurückgelegtem Fahrzeugkilometer. Die Ursache dieses Effektes begründet sich im wesentlichen in der Zunahme der Fahr- und Beschleunigungswiderstände [4]. Im Rahmen der Modellierung wird daher die Fahrzeugzuladung als emissions- und verbrauchsbestimmender Parameter berücksichtigt.

Das individuelle Fahrverhalten des Fahrzeugführers kann Verbräuche und Emissionen in nicht unwesentlichem Maße beeinflussen. Untersuchungen zeigen, daß die Verbräuche um 10 - 20 % anwachsen können, bedingt durch negatives Fahrverhalten des Fahrzeugführers [10, 14]. Da unser Modell darauf ausgerichtet ist, Distributionsnetze aus strategischer Sicht zu bewerten, wird das individuelle Fahrverhalten des Fahrzeugführers nicht explizit berücksichtigt. In Tabelle 3 werden die wesentlichen Einflußfaktoren auf Verbräuche und Emissionen beim Straßengüterverkehr, sowie deren Abbildung im Modell dargestellt.

Einflußfaktoren	Abbildung im Modell
Fahrzeugeigenschaften: - Motor mit Aggregaten - Leergewicht - Fahrwiderstand - Energieverbrauch der Nebenaggregate - Wartungszustand	Zulässiges Gesamtgewicht
Fahrgeschwindigkeit: - Straßentyp - Topographie der Fahrstrecke - Verkehrsdichte - Verkehrsführung	Fahrgeschwindigkeit (Funktion der Entfernung und Gemeindegröße)
Fahrleistung	Transportentfernung
Zuladung	Zuladung
Individuelles Fahrverhalten	-

Table 3: Einflußgrößen auf Emissionen, Kraftstoff- und Energieverbrauch

Die oben dargestellten Annahmen führen zu dem folgenden Modell:



- l Index der Fahrzeugklasse (Zulässiges Gesamtgewicht)
 u Index der Umweltgröße (z.B. Kraftstoffverbrauch, CO-Emission)
 a_α Auslastungsfaktor
 v Fahrgeschwindigkeit [km/h]
 d Transportentfernung [km]
 eb_{ul} Basisumweltfaktor für für Fahrzeugklasse l und Umweltgröße u [kg/km], [kWh/km]
 e_{ul} Umweltfaktor für für Fahrzeugklasse l und Umweltgröße u [kg/km], [kWh/km]
 z_u Zuschlagsfaktor für indirekte Emissionen für Umweltgröße u
 E_u Emission, Kraftstoff-, Energieverbrauch [kg], [l], [kWh]
 G Gemeindegröße
 Q Fahrzeugzuladung [kg]

$$v = f(d, G) \quad (1)$$

$$e_{ul} = z_u \cdot a_\alpha \cdot eb_{ul}(v) \quad (2)$$

$$E_u = d \cdot e_{ul} \quad (3)$$

Grundsätzlich werden die Emissionen, Kraftstoff- und Energieverbrauch unter Verwendung eines Umweltfaktors e_{ul} , der eine spezifische Größe der Fahrleistung ist, errechnet. Das Produkt aus Transportentfernung und dem Umweltfaktor ergibt den Betrag der Umweltkenngroße (z.B. CO-Emission). Hinsichtlich der Umweltfaktoren werden im vorgestellten Modell 8 Umweltgrößen u (Primärenergieverbrauch, Kraftstoffverbrauch, CO, CO₂, NO_x, SO₂, H_xC_y, Partikel) und 10 Fahrzeugklassen l unterschieden. Die Fahrzeugklassen sind differenziert nach zulässigem Gesamtgewicht des Fahrzeugs, wobei Daten für 4 Solo-Fahrzeugklassen, 4 Lastzugklassen und 2 Sattelzugklassen im Modell hinterlegt sind. Darüber hinaus wird eine Abhängigkeit des Umweltfaktors von der Fahrgeschwindigkeit v und der Fahrzeugzuladung, bzw. -auslastung α , auf der Transportstrecke berücksichtigt. Hierbei bestimmt sich die Fahrgeschwindigkeit als Funktion der Transportentfernung d und der Gemeindegröße G. Die Abhängigkeit des Umweltfaktors e_{ul} von der Fahrgeschwindigkeit wird über ein konvexes Polynom beschrieben (vgl. Abbildung 1), welches auf der Grundlage von Daten des Umweltbundesamtes [16] durch nicht-lineare Regressionsrechnung ermittelt wurde. Dieses konvexe Polynom soll im folgenden als Basisumweltfaktor eb_{ul} bezeichnet werden. Die Daten des Umweltbundesamtes umfassen nur direkte Emissionen, deshalb erfolgt die Einführung eines Zuschlagsfaktors z_u , der auch indirekte Emissionen berücksichtigt. Bzgl. der Zuladung wurde eine lineare Abhängigkeit des Umweltfaktors angenommen (Auslastungsfaktor a_α), wobei zugrundegelegt wurde, daß der Kraftstoffverbrauch zwischen einem voll ausgelasteten Fahrzeug und leeren Fahrzeug um ca. 20 % differiert [16]. Die Abbildung 1 verdeutlicht die Zusammenhänge. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Graph des Basisemissionsfaktors für CO-Emissionen, dargestellt über der Geschwindigkeit v und über 4 verschiedene (Solo-) LKW-Klassen.

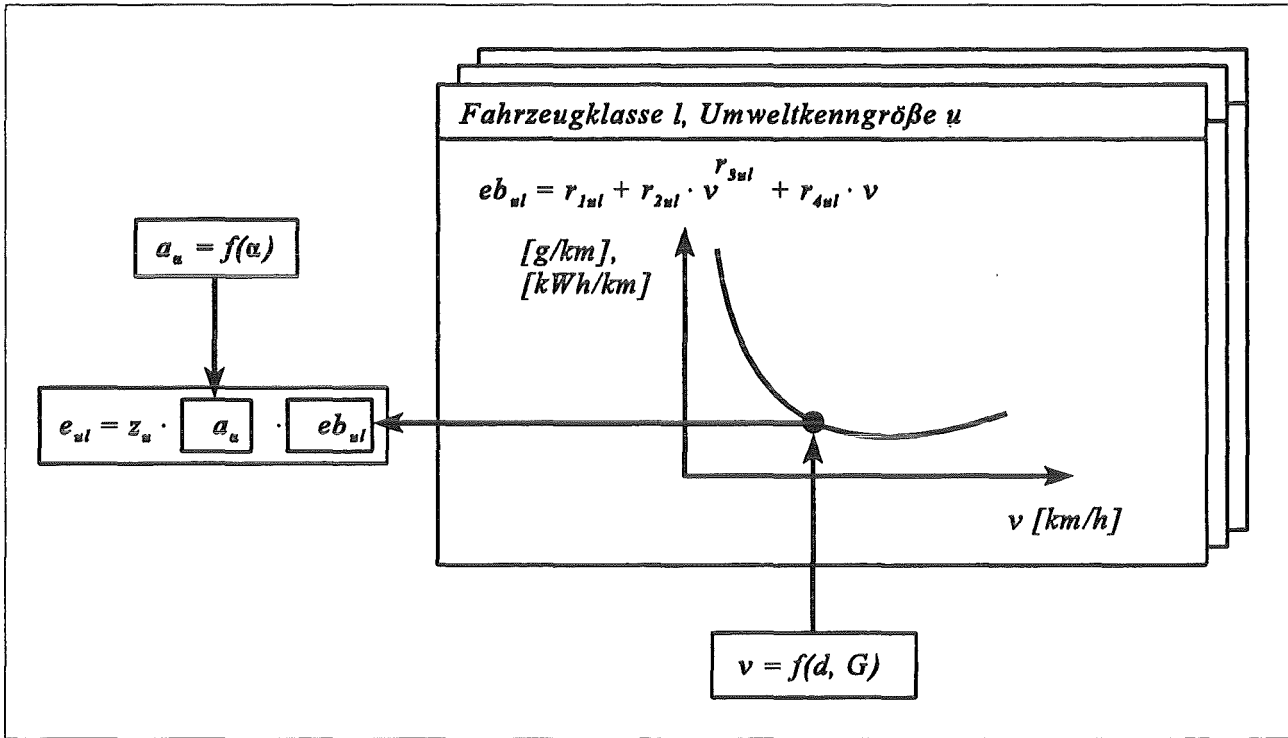


Abbildung 1: Ermittlung des Umweltfaktors

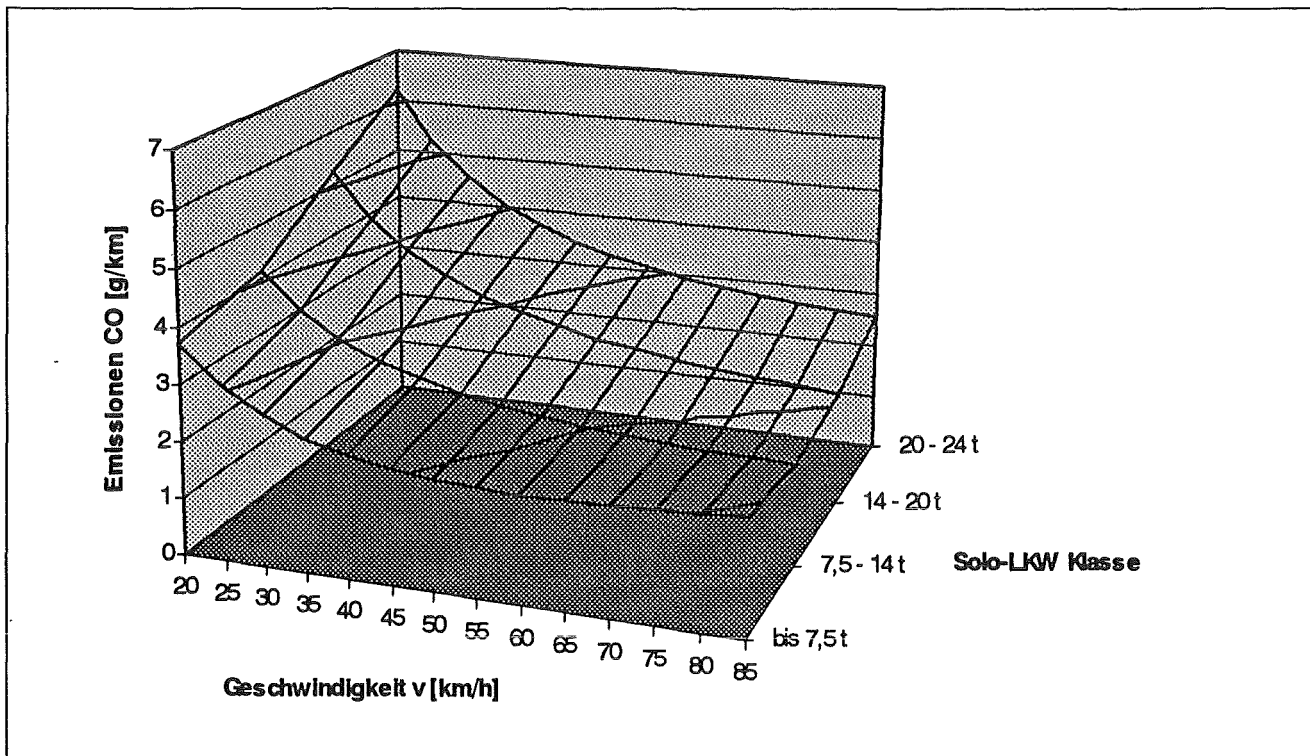


Abbildung 2: Basisemissionsfaktor für CO



Bahntransport

Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Modellierung des Bahntransportes dargestellt. In diesem Zusammenhang können hinsichtlich der Energieverbräuche und Emissionen folgende Einflußgrößen als wesentlich herausgestellt werden [18]: Eigenschaften des Zuges, Streckennetz, Transportentfernung, Zuladung, räumliche Zuordnung des Transports.

Die für Energieverbrauch und Emission wesentlichen Eigenschaften des Zuges resultieren zum einen aus der Traktionsart der Lok, wobei zwischen dieselgetriebenen und elektrogetriebenen Lokomotiven zu unterscheiden ist. Brennkraftlokomotiven erzeugen ihre Antriebsleistung durch Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff, wobei direkte Emissionen entstehen, während elektrische Lokomotiven den zur Erbringung der Transportleistung erforderlichen Strom überwiegend aus speziellen Kraftwerken zur Bahnstromerzeugung beziehen. Hierbei entstehen lediglich indirekte Abgasemissionen [17].

Darüber hinaus ist die Leistung der Lok als emissions- und energieverbrauchsbeeinflussende Eigenschaft des Zuges zu betrachten. Grundsätzlich gilt der Zusammenhang, daß Emissionen und Energieverbrauch positiv mit der Nennleistung der Triebseinheit korreliert sind. Allerdings ist davon auszugehen, daß im Betriebsablauf die Waggonlast der Lokleistung i.d.R. angepaßt wird, so daß sich der transportleistungsspezifische Energieverbrauch grundsätzlich nicht wesentlich ändert [4].

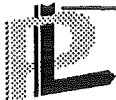
Im Rahmen der emissions- und verbrauchsbestimmenden Zugeigenschaften ist u.a. das Eigengewicht (Leergewicht) des Zuges zu berücksichtigen, welches den Fahrwiderstand beeinflusst. Das Eigengewicht des Zuges setzt sich aus dem Gewicht der Lok und dem Leergewicht der Waggonen, welches stark mit der Anzahl der Achsen korreliert ist, zusammen. Prinzipiell gilt der Zusammenhang, daß mit wachsendem Eigengewicht der Fahrwiderstand steigt, wodurch Emissionen und Verbräuche zunehmen [18].

Eine weitere energieverbrauchs- und emissionsbestimmende Einflußgröße stellt die Ausgestaltung des zum Transport genutzten Streckennetzes dar, wobei in diesem Zusammenhang zwischen netzphysischen und betriebsspezifischen Einflußfaktoren differenziert werden kann.

Den netzphysischen Faktoren ist der Ausbauzustand der genutzten Gleisstrecken, welche sich beispielsweise in Haupt- und Nebenstrecken unterscheiden lassen, zuzurechnen. Hauptstrecken ermöglichen baubedingt i.d.R. höhere Zuggeschwindigkeiten im Vergleich zu Nebenstrecken. Dies resultiert u.a. aus der günstigeren Topographie, welche sich in einer vergleichsweise geringeren Anzahl von Gleisbiegungen und einer niveaubegradigten Streckenführung widerspiegelt. Darüber hinaus ist auf Hauptstrecken, eine geringere Anzahl mit reduzierter Fahrgeschwindigkeit zu überfahrender Weichen und eine bessere Gleisfundamentierung zu beobachten, welche sich stabiler gegenüber den mit zunehmender Geschwindigkeit wachsenden dynamischen Kräften des Fahrbetriebs verhält.

Den betriebsspezifischen Faktoren sind sämtliche Einflußgrößen, welche durch operative Abwicklung des Fahrbetriebs auf die Fahrgeschwindigkeit des Zuges wirken, zuzurechnen. Hierzu zählt im wesentlichen die Fahrplangestaltung und Signalschaltung, welche über die Anzahl der Halte und den damit verbundenen, energieaufwendigen Anfahrvorgängen den Energieverbrauch und die Emissionen beeinflusst [4].

Analog zur Transportabwicklung mit dem LKW sind beim Bahntransport Energieverbrauch und Emissionen von der erbrachten Fahrleistung, bzw. der zurückgelegten Transportentfernung abhängig. Es



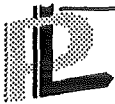
ist davon auszugehen, daß sich Emissions- und Verbrauchsgrößen hierbei auch näherungsweise proportional zur Transportentfernung verhalten.

Die Zuladung wirkt auf Emissionen und Verbräuche, indem sie den Fahrwiderstand des Zuges maßgeblich beeinflußt. Hiervon betroffen sind der Roll- und Beschleunigungswiderstand, welche eine positive Korrelation zur transportierten Nutzlast aufweisen. Bei der Deutschen Bahn AG ist eine mittlere gewichtsmäßige Zugauslastung von ca. 30 % zu beobachten [18].

Bedingt durch den unterschiedlichen technologischen Entwicklungsstand der Alten und der Neuen Bundesländer ist die räumliche Zuordnung des Bahntransportes zu beachten. Im Bereich der Diesel- als auch der Elektrotraktion konnten in der Vergangenheit in den Neuen Bundesländern höhere Verbrauchs- und Emissionswerte beobachtet werden. Diese resultieren bei der Elektrotraktion zum einen aus den vergleichsweise niedrigeren Kraftwerkswirkungsgraden im Rahmen der Primärenergieumwandlung und dem anteilig relativ hohen Braunkohleeinsatz bei der Bahnstromerzeugung. Darüber hinaus wird, infolge der mangelnden Elektrifizierung des Schienennetzes, in den Neuen Bundesländern ein wesentlich höherer Anteil der Transportleistung per Dieseltraktion erbracht. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, daß aufgrund des regional unterschiedlichen Mix von Diesel- und Elektroantrieb die gemittelten, transportleistungsspezifischen Energieverbräuche und die entsprechenden Emissionen zwischen Alten und Neuen Bundesländern verschieden sind. Die aufgezeigten regionalen Unterschiede werden sich in Zukunft allerdings abschwächen, da zumindest mittel- bis langfristig eine technologische Anpassung der Neuen Bundesländer an den Standard der Alten Bundesländer zu erwarten ist [17].

Da der Verlager i.d.R. keine genauen Informationen über die Transportabwicklung der Bahn besitzt, ist häufig die Ausprägung der beschriebenen Einflußgrößen nicht bekannt. Zur Erstellung eines operablen Modells ist daher die Komplexität zu reduzieren. Im Modell wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- a) Die Eigenschaften der zum Transport genutzten Zugarten und das genutzte Streckennetz besitzen im Mittel die gleichen Eigenschaften, wie das der durchschnittlich von der Deutschen Bahn AG für den Gütertransport genutzte Netz und die darauf eingesetzten Züge.
- b) Es wird unterstellt, daß die Züge, welche für den Gütertransport genutzt werden, im Mittel gleichmäßig ausgelastet sind und deren Auslastung der mittleren Zugauslastung der Deutschen Bahn AG entspricht. Somit können die Umweltkenngrößen proportional zu der für die Fracht erbrachten Transportleistung [tkm] bestimmt werden, da die transportleistungsspezifischen Emissionen und Verbräuche konstant sind. Die Annahmen unter a) und b) führen dazu, daß aggregierte Daten der amtlichen Bahnstatistik zur Bewertung des Bahntransportes herangezogen werden können.
- c) Es soll keine Unterscheidung zwischen dem Bahntransport in den Alten und Neuen Bundesländern vorgenommen werden, da einerseits eine eindeutige räumliche Zuordnung der im Rahmen des Bahntransportes genutzten Technologien nicht möglich ist. Beispielsweise wird Bahnstrom aus Kraftwerken der Alten Bundesländer, dessen Erzeugung im Vergleich zu den Neuen Bundesländern geringere Emissionen verursacht, im Bedarfsfall in das Bahnstromnetz der Neuen Bundesländer gespeist. Ferner ist zu erwarten, daß, wie bereits dargestellt, zumindest mittelfristig eine regionale technologische Anpassung der Neuen an die Alten Bundesländer stattfinden wird



[3]. Vor diesem Hintergrund werden zur Ermittlung der transportbedingten Emissionen und des Energieverbrauchs Daten der Alten Bundesländer als Berechnungsgrundlage herangezogen.

Die Tabelle 4 zeigt die wesentlichen verbrauchs- und emissionsbestimmenden Größen und deren Abbildung im Modell auf.

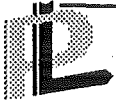
Wesentliche Einflußgrößen	Abbildung im Modell
Eigenschaften des Zuges: - Traktionsart - Leistung der Lok - Leergewicht	-
Schienennetz: - Ausbauzustand der Gleisanlage - Topographie der Fahrstrecke - Verkehrsführung	-
Transportentfernung	Transportleistung
Zuladung	
Räumliche Zuordnung des Transportes	-

Tabelle 4: Einflußgrößen des Schienentransports

Die Tabelle 5 zeigt die auf die Transportleistung bezogenen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für den Bahntransport. Der Partikel-Emissionsfaktor wurde auf Basis einer PROGNOSE-Studie [3], die übrigen Werte auf Grundlage einer IFEU-Studie [17] bestimmt.

Umweltfaktor	Faktorwert e_u	Maßeinheit
Primärenergiefaktor	$18,87 \cdot 10^{-2}$	kWh/tkm
Abgas- Emissionsfaktor	CO	kg/tkm
	CO ₂	
	NO _x	
	SO ₂	
	H _y C _z	
	Partikel	

Tabelle 5: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für den Bahntransport



Binnenschiff

Nachfolgend werden Parameter systematisiert, die wesentlichen Einfluß auf die Verbräuche und Emissionen beim Gütertransport mit dem Binnenschiff ausüben. Folgende Einflußgrößen können als relevant erachtet werden [4]: Schiffseigenschaften, Binnenwasserstraßennetz, Transportentfernung, Zuladung.

Die verbrauchs- und emissionsrelevanten Schiffseigenschaften werden zum einen geprägt durch die technische Ausgestaltung des Motors für den Schraubenantrieb und die Motoraggregate. Binnengüterschiffmotoren sind bis auf wenige Ausnahmen dieselgetrieben und arbeiten im Vergleich zum LKW-Motor mit niedrigerer Drehzahl. Bedingt durch das relativ hohe Durchschnittsalter der Binnenschiffe, weist die verwendete Motor- und Aggregatechnik im Mittel einen niedrigeren technischen Standard in Relation zum LKW aus, was sich in einem schlechteren Wirkungsgrad bei der Endenergienutzung widerspiegelt. Grundsätzlich gilt der Zusammenhang, daß mit zunehmender Tragfähigkeit (Ladekapazität) des Binnenschiffs die Antriebs(nenn)leistung der eingesetzten Motoren wächst [4].

Eng im Zusammenhang mit der technischen Motorausgestaltung ist auch der Wartungszustand des Motors und seiner Aggregate zu berücksichtigen, welcher erfahrungsgemäß einen nicht unwesentlichen Einfluß auf Verbräuche und Emissionen besitzt. Hierzu sind jedoch keine detaillierten Untersuchungen in der Literatur verfügbar.

Darüber hinaus sind die hydrodynamischen Eigenschaften, welche u.a. durch den Fahrwiderstand des Binnenschiffs im Wasser beschrieben werden, zu betrachten. Der Fahrwiderstand wird im wesentlichen durch die relative Strömungsgeschwindigkeit des Fahrwassers zur Schiffsgeschwindigkeit, der Rumpfform und der eingetauchten Rumpfqerschnittsfläche, welche sich aus dem zuladungsabhängigen Tiefgang und der Rumpfbreite ermittelt, bestimmt [4].

Neben den Schiffeigenschaften sind die Eigenschaften des zum Transport genutzten Binnenwasserstraßennetzes als verbrauchs- und emissionsrelevante Einflußgrößen zu betrachten. Hierbei kann analog zum Bahntransport zwischen netzphysischen und betriebsspezifischen Einflußfaktoren differenziert werden. Den betriebsspezifischen Einflußfaktoren sind sämtliche Einflüsse zuzurechnen, welche durch verkehrsregelnde Maßnahmen auf den Wasserstraßen bedingt werden. Ihr Einfluß auf Energieverbrauch und Emissionen ist jedoch im Rahmen der Binnenschifffahrt nur von untergeordneter Bedeutung, so daß sich die Untersuchungen auf die netzphysischen Einflußfaktoren konzentrieren.

Wesentlich ist im Zusammenhang mit den netzphysischen Einflußfaktoren die Ausprägung der Fahrwasserströmung zu betrachten. Werden Energieverbrauch und Emissionen in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit untersucht, so ist fahrrihtungsspezifisch zwischen der Bergfahrt entgegen der Strömungsrichtung und Talfahrt in Strömungsrichtung zu differenzieren. Bei der Bergfahrt erhöht sich der Energieverbrauch mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des Gewässers, während bzgl. der Talfahrt das umgekehrte Verhältnis festzustellen ist. Ein regulierender Einfluß auf die Strömungsgeschwindigkeit wird durch den Betrieb von Schleusen, welche häufig auf schiffbaren Binnengewässern zu finden sind, ausgeübt. Vor der Einfahrt in eine Schleuse ist eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit des Binnenschiffes, evt. durch Gegenschub, notwendig. Diese schleusungsbedingte Unterbrechung des Fahrtablaufs erfordert einen zusätzlichen Energieaufwand und erzeugt somit erhöhte Emissionen. Einen



weiteren netzphysischen Einflußfaktor stellt die Querschnittsfläche des Wasserweges dar. Die Querschnittsfläche des Gewässers beeinflußt den Fahrwiderstand, wobei prinzipiell der Zusammenhang gilt, daß mit abnehmender Fahrwassertiefe und -breite der Fahrwiderstand zunimmt und somit Energieverbrauch und Emissionen steigen [4, 18].

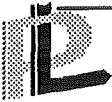
In analoger Form zum Straßen- und Schienengütertransport ist auch beim Binnenschiff eine Abhängigkeit der Emissionen und Verbräuche von der zurückzulegenden Transportentfernung und der Zuladung, welche den Tiefgang beeinflußt, zu beobachten [4].

Die Darstellungen zeigen die komplexe Abhängigkeit des Energie-, Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen von zahlreichen Einflußfaktoren auf. In vergleichbarer Weise zum Bahntransport ist zur Erstellung eines operablen Bewertungsmodells für den Binnenschifftransport ist eine Komplexitätsreduzierung erforderlich. Hierzu wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- a) Die für die Transporte genutzten Binnenschiffe und Wasserwege verhalten sich im Mittel so, wie die, welche im Durchschnitt von der Deutschen Binnenschiffahrtsflotte genutzt werden.
- b) Es wird von einer konstanten Auslastung der zum Transport genutzten Binnenschiffe ausgegangen, wobei die unterstellte Auslastung der durchschnittlichen Auslastung der Deutschen Binnenschiffahrtsflotte entsprechen soll.

Aufgrund der Annahmen unter a) und b) wird einerseits die Verwendung von gesamtwirtschaftlichem Datenmaterial zur Ermittlung der Umweltfaktoren ermöglicht. Andererseits verhalten sich bei konstanter Auslastung (Annahme b)) die transportleistungsspezifischen Emissionen und Verbräuche ebenfalls konstant, so daß im betrachteten Modell Umweltfaktoren herangezogen werden können, die sich als spezifische Größe der Transportleistung darstellen. Somit ergibt sich der in der Tabelle 6 dargestellte Modellzusammenhang.

Die Tabelle 7 gibt eine Übersicht der transportleistungsspezifischen Emissionsfaktoren für den Binnenschifftransport. Analog zur Vorgehensweise beim Bahntransport wurde der Partikel-Emissionsfaktor wurde auf Basis einer PROGNOSE-Studie [3], die übrigen Werte nach einer IFEU-Studie [17] bestimmt.



Wesentliche Einflußgrößen	Abbildung im Modell
Eigenschaften des Binnenschiffs: - Motor mit Aggregaten - Wartungszustand - Hydrodynamik - Nebenaggregate	-
Binnenwasserstraßennetz: - Strömungsgeschwindigkeit - Fahrrichtung - Querschnittsfläche des Wasserwegs - Schleusen	-
Transportentfernung	Transportleistung
Zuladung	

Tabelle 6: Einflußgrößen beim Binnenschifftransport

Umweltfaktor	Faktorwert e_u	Maßeinheit	
Primärenergiefaktor	$13,13 \cdot 10^{-2}$	kWh/tkm	
Kraftstofffaktor	$10,00 \cdot 10^{-3}$	kg/tkm	
Abgas- Emissionsfaktor	CO		$15,12 \cdot 10^{-5}$
	CO ₂		$34,03 \cdot 10^{-3}$
	NO _x		$60,49 \cdot 10^{-5}$
	SO ₂		$47,26 \cdot 10^{-6}$
	H _y C _z		$10,59 \cdot 10^{-5}$
Partikel	$18,90 \cdot 10^{-6}$		

Tabelle 7: Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für den Binnenschifftransport



	LKW	Bahn	Binnenschiff
Primärenergieverbrauch	100,0 %	63,7 %	44,4 %
Kraftstoffverbrauch	100,0 %	entfällt	44,4 %
CO	100,0 %	17,9 %	54,0 %
CO ₂	100,0 %	45,7 %	40,7 %
NO _x	100,0 %	31,8 %	68,7 %
SO ₂	100,0 %	46,1 %	21,5 %
H _y C _z	100,0 %	36,8 %	111,5 %
Partikel	100,0 %	16,7 %	31,5 %

Tabelle 8: Gegenüberstellung von LKW, Bahn und Binnenschiff

Nachfolgend wird eine einfache Vergleichsrechnung für den Transport einer Ladung von 10 t über 200 km Entfernung unter Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel durchgeführt. Hierbei soll für den Straßengüterverkehr ein LKW-Zug in der Klasse von 28 bis 32 t zulässiges Gesamtgewicht mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 60 km/h im Fernverkehr eingesetzt werden. Die gewichtsmäßige Fahrzeugauslastung wurde mit 50 % angenommen. Eine Gegenüberstellung der Emissionen zeigt Tabelle 8, wobei die Größen auf die Basis des LKW-Transports (100%) normiert wurden.

Das Beispiel zeigt ökologische Vorteile für den Bahn- und Binnenschifftransport gegenüber dem Straßengüterverkehr. Die Ergebnisse sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da sie nur Gültigkeit im Rahmen der getroffenen Annahmen besitzen. Zum einen wird implizit unterstellt, daß bei vorgegebener Quelle-Ziel-Relation die erforderliche Fahrleistung bei allen drei Verkehrsträgern gleich groß ist. Diese Voraussetzung ist zumindest beim Binnenschifftransport häufig nicht gegeben, da aufgrund des sehr grobmaschigen Wasserstraßennetzes i.d.R. Umwege für den Transport in Kauf genommen werden müssen. Ferner sind im Rahmen des Bahn- und Binnenschifftransportes oftmals Vorläufe und Nachläufe per LKW erforderlich, um die Ver- und Entladestellen (z.B. Bahnhöfe, Häfen) erreichen zu können. Wie auch eigene Untersuchungen zeigen, kann sich unter Berücksichtigung dieser Restriktionen die ökologische Vorteilhaftigkeit zugunsten des LKW verschieben (siehe auch [21]).

3. Fallstudie in der Konsumgüterdistribution

Das in Abschnitt 2 beschriebene Umweltbewertungsmodell wurde in ein strategisches Planungssystem zur Analyse und Optimierung von Distributionsstrukturen DISI (Distributionssimulation und -optimierung) implementiert. Das System wurde in der Programmiersprache FORTRAN entwickelt und arbeitet unter dem Betriebssystem OS/2. Das Planungssystem basiert auf einem Mehrprodukt-Netzwerkflußalgorithmus und kann Distributionsnetze unter Berücksichtigung auch nicht linearer Transport-, Handlings- und Produktionskosten optimieren [12, 23]. Entscheidungsgrößen (Variablen) sind dabei im wesentlichen die Anzahl und die Funktion der Standorte (Werk-, Lager-, Umschlagpunkt-Standorte) sowie die zwischen

den Standorten und die zu den Kunden zu nutzenden Transportwege. Ergebnisgrößen sind u.a. die Distributionskosten, die genutzten Transportrelationen und somit die Transportentfernungen sowie die auf den Relationen zu transportierenden Mengen, bzw. Sendungsgrößen, welche als Eingangsdaten für das beschriebene in Abschnitt 2 beschriebene Umweltmodell dienen.

Im folgenden soll die Distributionsstruktur eines Herstellers der Lebensmittel-Industrie betrachtet werden. Das Distributionsnetz des Konsumgüterherstellers in der betrachteten Fallstudie gestaltete sich dabei folgendermaßen (Ist-Situation): Ausgehend von 3 Werken (W), 2 im Norden, eines im Osten Deutschlands gelegen, werden die Produkte in 2 vollsortimentierten Zentrallägern (ZL) eingelagert. Von dort aus werden 4 Regionalläger (RL) beliefert, die ca. 20 nicht bestandsführende Umladepunkte (UP) im Bundesgebiet versorgen. Die Belieferung der Kunden, im wesentlichen Einzelhandel und Großhandel, erfolgt für Kleinsendungen (≤ 1000 kg) ab ZL, RL und UP, Großsendungen (> 1000 kg) werden auch über größere Entfernungen, allerdings nur direkt, ab ZL und RL zugestellt. Die Belieferung der Kunden erfolgt aus Gründen einer hohen angestrebten Fahrzeugauslastung in Touren, welche hinsichtlich der Tourlänge und Fahrzeugauslastung geeignet abgeschätzt werden [11, 20, 13]. Abbildung 2 verdeutlicht die Ist-Situation.

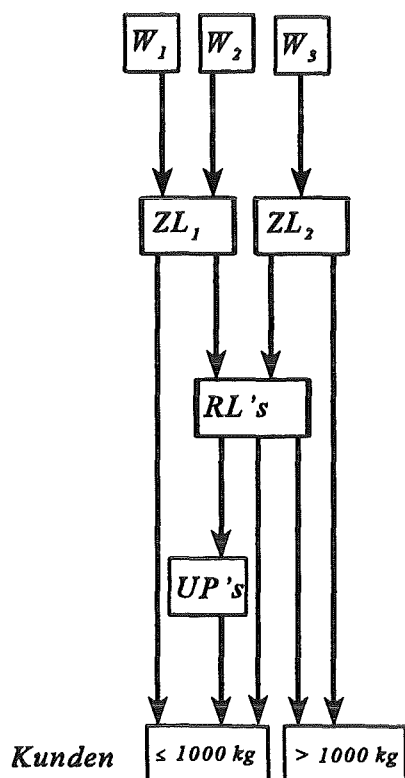


Abbildung 2: Ist-Situation

Tabelle 9 zeigt die Sendungsgrößenstruktur auf. Der größte Anteil der Tonnage (84 %) wird direkt ab ZL, bzw. ab RL, an die Kunden ausgeliefert. Lediglich 16 % der Tonnage, aber 84 % der Aufträge bestehen aus Kleinsendungen. Die Transporte und die Lagerung werden durch einen Logistikdienstleister erbracht,



wobei ein mengen- und entfernungsdegressiver Transporttarif als Abrechnungsmodus zugrundegelegt wird.

		Tonnage p.a. [t]	Anzahl Sendungen p.a.	Mittlere Sendungsgröße [kg]
Sendungsgröße	≤ 1.000 kg	23.500 (16 %)	140.900 (84 %)	170
	> 1.000 kg	120.100 (84 %)	26.390 (16 %)	4.550
Summe		143.600 (100%)	167.290 (100 %)	860

Tabelle 9: Sendungen zum Kunden

Im Fernverkehr zur Belieferung der Läger, UP und Großkunden werden Lastzüge, die ein zulässiges Gesamtgewicht von 40 t besitzen, eingesetzt. Aufgrund der Sperrigkeit der Ware wird von einer maximalen gewichtsmäßigen Fahrzeugkapazität von 18,7 t ausgegangen. Für die Nahverkehrstouren zur Belieferung der Kleinkunden finden LKW mit 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht und 3,5 t Nutzlastkapazität Einsatz.

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der Verbrauchs- und Emissionswerte für die Ist-Situation und den Betrachtungszeitraum eines Jahres. Die Werte wurden auf Grundlage des in Abschnitt 2 dargestellten Bewertungsmodells ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, daß für jede Tonne der im System bewegten Ware im Mittel ca. 440 km Fahrleistung und ca. 15 l Dieselkraftstoff erforderlich waren.

Fahrleistung [10 ³ km]	7.805	CO ₂ [t]	6.831
Transportleistung [10 ³ tkm]	63.730	NO _x [t]	72
Primärenergie [10 ³ kWh]	24.425	SO ₂ [t]	17
Diesel [10 ³ l]	2.177	H _x C _y [t]	12
CO [t]	21	Partikel [t]	5

Table 10: Umweltbewertung der Ist-Situation

		Fahrleistung [10 ³ km p.a.]	Dieselverbrauch	
			[10 ³ l p.a.]	[l/100 km]
Anlieferung	W.. RL/UP	(19 %) 1.511	(23 %) 561	37,1
Auslieferung	> 1000 kg	3.058	1.108	36,2
	≤ 1000 kg	3.235	570	17,6
	Total	(81 %) 6.293	(77 %) 1.678	26,7
Total		7.805	2.177	27,9

Table 11: Umweltkenngrößen nach Transportstufen



Werden die Umweltkenngrößen der Ist-Situation über die verschiedenen Transportstufen des Distributionssystems betrachtet (Tabelle 11), so zeigt sich, daß der größte Teil der Fahrleistung (81 %) im Rahmen der Auslieferung ab Lager, bzw. ab UP, an den Kunden erbracht wird. Ist davon auszugehen, daß der Einsatz alternativer Verkehrsträger, welche als umweltfreundlicher gelten, wie z. B. Bahn und Binnenschiff, zu einer direkten Belieferung der Kunden in der Fläche i.a. unbrauchbar sind, so wird deutlich, daß das Potential zur Verlagerung der Verkehre, gemessen an der Fahrleistung, ca. nur 20 % bei der Ist-Struktur beträgt.

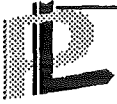
Eine Veränderung der bestehenden Distributionsstruktur durch Zentralisierung der Produktion (Konzentration der Produktion in 2 Werken) würde eine Reduzierung der Transport und Handlingskosten sowie der zu erbringenden Fahrleistung bedingen (Szenario 2 in Tabelle 12). Dieser Effekt liegt überwiegend in der optimierten Zuordnung der Kunden zu den Lägern, bzw. UP, begründet. Eine Zentralisierung der Lagerung durch Reduzierung der Anzahl bestandsführender Läger führt zu einer moderaten Steigerung der Kosten gegenüber Szenario 2, Kraftstoffverbrauch und Fahrleistung wachsen jedoch stark an. Die Kosten bleiben unter dem Niveau der Ist-Situation, Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch nehmen jedoch vergleichsweise zu. Das Ergebnis zeigt, daß eine Kostenoptimierung in der vorliegenden Fallstudie zu einer Zunahme verkehrsbedingter Belastungen für die Umwelt führt. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse auf, wobei die Ist-Situation den Bezugspunkt (1000) darstellt.

Nr.	Szenario	Kosten	Fahrleistung	Diesel
1	Ist-Situation (2 ZL, 4 RL)	1000	1000	1000
2	Produktionszentralisation	957	991	1001
3	1 ZL, 3 RL	961	1019	1018
4	1 ZL, 2 RL	965	1026	1028

Table 12: Bewertung verschiedener alternativer Distributionsstrukturen

4. Ausblick

Das beschriebene Fallbeispiel stellt ein erstes exemplarisches Untersuchungsergebnis dar. Zukünftig sollen weitere Distributionsstrukturen von Konsumgüterherstellern untersucht werden, mit der Zielsetzung, Trends in der Distributionslogistik zu analysieren und diese unter Umweltgesichtspunkten zu bewerten. Ein Untersuchungsziel hierbei ist, die Abhängigkeit zwischen Veränderungen im Distributionskostenniveau (im wesentlichen Transportkosten) und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Verkehre zu quantifizieren. Hierdurch könnte ein Diskussionsbeitrag zur Frage nach einer unter ökologischen Gesichtspunkten sinnvollen Struktur und Höhe der Transporttarife geleistet werden. Darüber hinaus sollen die Möglichkeiten des Einsatzes zum LKW alternativer Verkehrsträger detailliert analysiert werden, mit der Zielsetzung, das Potential und die Umweltwirkung der Substitution von Straßengütertransporten innerhalb von Distributionsnetzen zu erfassen. Dies könnte zu einer Versachlichung der oftmals eher auf emotionaler Ebene geführten Diskussion bzgl. der Verlagerung von

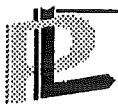


Güterverkehren von der Straße auf die Schiene und das Binnenschiff beitragen. Ferner wäre unter Nutzung des beschriebenen Modells eine quantitative Bewertung neuerer ökologieorientierter Konzepte der Distributionslogistik, wie z.B. Güterverkehrszentrumskonzepte oder Citylogistikkonzepte, unter Umweltgesichtspunkten denkbar.



Literatur

- [1] Ahrens, G.-A. u.a.: Verkehrsbedingte Luft- und Lärmbelastungen. Emissionen, Immissionen, Wirkungen. Umweltbundesamt Texte 40/91, Berlin 1991.
- [2] Baum, F.: Umweltschutz in der Praxis. 2. verbesserte und wesentlich erweiterte Auflage. München/Wien 1992.
- [3] Becker, U. u.a.: Entwicklung der Emissionen von Luftschadstoffen und CO₂ durch den Verkehr in Ost- und Westdeutschland bis 2010. Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Forschungsbericht FE-Nummer 90344/91. Basel 1993.
- [4] Bialonski, W. u.a.: Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr. Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche. Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Forschungsbericht FE-Nr.: 90 247/88, Aachen 1990.
- [5] Breiter, B.: Ein Beitrag zur Optimierung straßenbautechnischer Entscheidungen unter energiewirtschaftlichen Aspekten. In: Schmuck, A. (Hrsg.): Verkehrsplanung und Straßenwesen. München 1986.
- [6] Bundesamt für Güterverkehr (Hrsg.): Fernverkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge 1993, Köln 1993.
- [7] Bundesminister für Verkehr (Hrsg.): Verkehr in Zahlen, Bonn 1995.
- [8] Bundestags-Enquete-Kommission: Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre. Klimarelevante Emissionen und Energieeinsatz des Verkehrssektors sowie Maßnahmen zur Reduktion von Schadstoffen und Energieeinsatz. Fragen und Sachverständigenkatalog für öffentliche Anhörung, Bonn 1989.
- [9] Commission of the European Communities/CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic, Volume 1: Methodology and Emission Factors. Final Report, Brüssel 1993.
- [10] Eberenz, R.: Optimale Fahrweisen für Kraftfahrzeuge. Verkehrswissenschaftliche Studien Heft 42, Göttingen 1990.
- [11] Fleischmann, B.: Distributionsplanung. In: Proceedings in Operations Research 8, S. 293-308, Wien 1979.
- [12] Fleischmann, B.: Designing distribution systems with transport economies of scale. In: European Journal of Operational Research, 70(1993), S. 31-42.
- [13] Fleischmann, B.: Design of freight traffic networks: Models, Methods and Applications. SVOR/ASOR Tutorial on new OR technologies for transportation and facility location. Thun 1995.
- [14] Gaßmann, S.: Untersuchungen zum Einfluß von Fahrzeug, Fahrer und Verkehr auf Betriebsweise und Kraftstoffverbrauch eines PKW im realen Stadtverkehr. In: Verein Deutscher Ingenieure



e.V. (VDI) - Fortschrittsberichte Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Düsseldorf 1991.

- [15] Hassel, D. u.a.: Das Abgas- und Emissionsverhalten von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland im Bezugsjahr 1980. Forschungsbericht des TÜV-Rheinland. Umweltbundesamt(UBA)-Berichte 11/83, Berlin 1983.
- [16] Hassel, D. u.a.: Abgasemissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland für das Bezugsjahr 1990. Umweltforschungsplan Nr. 104 05 151/02, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin 1995.
- [17] Höpfner, U. u.a.: Motorisierter Verkehr in Deutschland. Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in der DDR, Berlin (Ost) und der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1988 und in Deutschland im Jahr 2005. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin 1992.
- [18] Hopf, R. u.a.: Verminderung der Luft- und Lärmbelastigungen im Güterverkehr 2010. Umweltbundesamt-Berichte 5/94, Forschungsbericht 104 05 962, Berlin 1994.
- [19] Kraus, S.: Ökologische Transportbewertung. Arbeitspapier am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, Produktion und Logistik, AIF-Projekt Güterverkehrsnetze Nr. 9767, Universität Augsburg 1995.
- [20] Kraus, S.: Abschätzung von Ferntouren. Arbeitspapier am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, Produktion und Logistik, Universität Augsburg 1996.
- [21] Liebscher, P. u.a.: Primärenergieeinsatz und CO₂-Emissionen im Personen und Güterverkehr. In: Internationales Transportwesen 47(1995)4, S. 171-179.
- [22] Moussiopoulus, N./ Oehler, W./ Zellner, K.: Kraftfahrzeugemissionen und Ozonbildung. Berlin u.a. 1989.
- [23] Paraschis, I. N.: Optimale Gestaltung von Mehrprodukt-Distributionssystemen. Heidelberg 1989.
- [24] Schmitz, S.: Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs in der Bundesrepublik Deutschland. Verursacherstruktur, räumliche Differenzierung und Ansätze zur Reduzierung, Bonn 1990.
- [25] Schuchardt, W.: Neue Produktions- und Logistikkonzepte und ihre Auswirkungen auf den Güterverkehr - Herausforderung zur Technikbewertung und zur Entwicklung umweltentlastender Güterverkehrs- und -verteilsysteme. In: VDI (Hrsg.): VDI-Berichte Nr. 817, Neue Konzepte für den fließenden und ruhenden Verkehr. Düsseldorf 1990, S. 177-216.
- [26] Spelthahn, S./ Schlossberger, U./ Steger, U.: Umweltbewußtes Transportmanagement. Bern/Stuttgart/Wien 1993

14 *Erfassung und Handhabung komplexer
Ökologiephänomene in der Logistik.*

Wehberg, G.

Erfassung und Handhabung komplexer Ökologiephänomene in der Logistik

Götz Wehberg*

I Zum Logistikverständnis

1. These von der Bedeutung der Evolutionstheorie für die Logistik

Die Um- und Innenkomplexität von Logistiksystemen steigt aufgrund entsprechender Veränderungen ökonomischer, technologischer, ökologischer und sozialer Faktoren insgesamt an. Sie ist das Produkt aus einer zunehmenden Kompliziertheit und Dynamik. Damit ändern sich auch die Wirkungsbedingungen für das Logistikmanagement. Eine Art Zeitschere öffnet sich (Abb. 1).

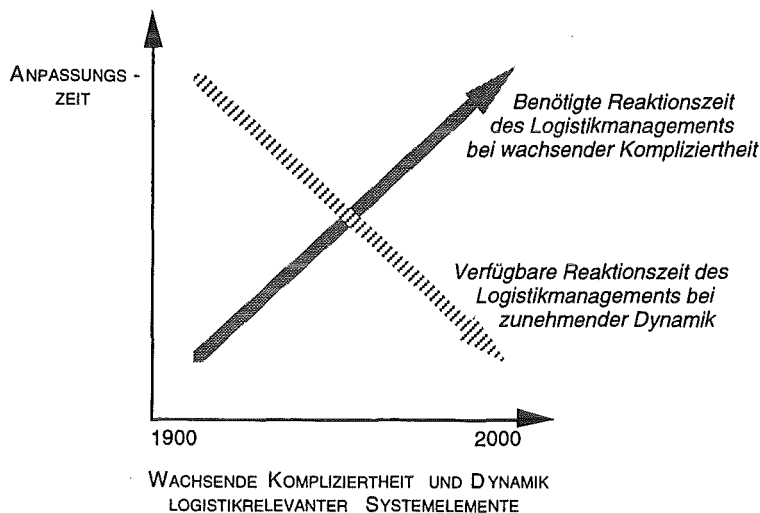


Abb. 1: Zeitschere der Logistik (Bleicher, 1991, Wehberg, 1994)

Die Managementkonzeption der Logistik vollzieht vor diesem Hintergrund einen Wandel von einer konstruktivistisch-voluntaristischen, der Beherrschbarkeitsillusion unterliegenden Koordinations- bzw. Flußorientierung (Klaus, 1994; Weber, Kummer, 1994) hin zu einer auf evolutionstheoretischen Grundlagen fußenden Entwicklungsorientierung (Wehberg, 1994). Letztere hat vor allem die Erfassung und Handhabung komplexer Logistikphänomene zum Gegenstand. Anders als bisherige Logistikverständnisse, die die Logistik primär als Gleichgewichtssystem verstehen und damit allenfalls auf einer Systemtheorie im engeren Sinne - gewissermaßen verstanden als 'systemische Brille' - basieren (z.B. Pfohl, 1990, 1994), schließt sie Ungleichgewichte explizit in die Betrachtung ein. Ihre Basis stellt folgerichtig die Systemtheorie im weiteren Sinne (Probst, 1981) dar, welche auch als Neue Systemtheorie oder Kybernetik zweiter Ordnung bezeichnet wird. Die Logistik kann mithin als ein 'spezieller Führungsansatz zur Gestaltung, Lenkung und Entwicklung effektiver und effizienter Objektflüsse in Wertschöpfungssystemen' (Göpfert, Wehberg, 1995) gekennzeichnet werden.

* Dipl.-Kfm. Götz Wehberg ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Logistik der Philipps-Universität Marburg sowie Stipendiat der Stiftung des Flughafens Frankfurt Main AG.

2. *These von der Aussagekraft des Entropiegesetzes für die Handhabung komplexer Ökologiephänomene*

Für das ökologieorientierte (Logistik-) Management scheint sich zunächst die 'Fruchtbarmachung' thermodynamischer Grundlagen, insbesondere des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, des sogenannten Entropiegesetzes, anzubieten (Fischer, 1995). Unter Entropie ist dabei der Anteil nicht mehr nutzbarer Energie zu verstehen (Georgescu-Roegen, 1974). Danach entropieren dissipative, d.h. lebende Systeme (wie die Logistik) ihre Umwelt umso stärker, je höher die ihnen zu eigene Ordnung im Sinne von Negentropie ist. Die Gleichsetzung von energetischer und sozio-technischer Ordnung, letztere wird hier als Komplexität eines (Logistik-) Systems bezeichnet, ist jedoch weder zweckmäßig noch zulässig. Sie führt zu der wenig hilfreichen Schlußfolgerung, ein (Logistik) System müsse möglichst simplex (im Sinne sozio-technischer Ordnung) gestaltet sein, um ökologieverträglich zu funktionieren. Pointiert gesagt: 'Zurück zur Steinzeit!' Outputseitige Umweltbelastungen (Immissionen) werden zudem nicht vollständig betrachtet. Das ökologie- sowie evolutionsorientierte Logistikverständnis im allgemeinen hat folgerichtig auf anderen Grundlagen zu fußen als nur auf der Thermodynamik. Hierzu gehören vor allem die Evolutionstheorie und der Holismus (Göpfert, Wehberg, 1995).

II Erfassung komplexer Ökologiephänomene aus informationstheoretischer Sicht

3. *These von der Bedeutung der Mustererkennung für die Koordinationsaufgaben der Logistik*

Die Koordination eines jeden wohl definierten Sachverhalts setzt die Transmission, also Aufnahme und Verarbeitung einer bestimmten Mindestmenge an Informationen voraus (Conant, 1968). Andererseits ist die Transmissionskapazität des Menschen begrenzt (Bremermann, 1962: Bremermann'sches Limit). Ein vollständiges Erfassen und Verarbeiten komplexer Logistikphänomene ist deshalb nicht möglich. Die Koordinationsfähigkeit des Logistikmanagements ist begrenzt.

Die Inanspruchnahme der Transmissionskapazität eines (Informations-) Systems hängt vor allem von der inputseitigen, d.h. aufzunehmenden Komplexität ab. Zur Steigerung der Koordinationsfähigkeit des Logistikmanagements kommt es deshalb darauf an, die zu erfassende Komplexität 'richtig' zu verdichten. Hier muß eine alleinige Detailanalyse aufgrund des Bremermann'schen Limits scheitern. Das 'Ganze ist eben mehr als die Summe seiner Teile' (Ropohl, 1975). Vielmehr bietet gerade die Erklärung des Systemverhaltens seinem Prinzip nach, die sogenannte Mustererkennung (von Hayek, 1972), Hilfestellung für das Erfassen komplexer Logistikphänomene. Muster sind erkennbar, weil in einem System regelmäßig nicht 'alles mit allem', sondern 'viele mit vielem' verbunden ist. Die Mustererkennung konzentriert sich damit vor allem auf die qualitative Komplexitätsdimension, also auf die Frage, wie 'viele mit vielem' verknüpft ist (Ulrich, Probst, 1991). Sie ist ein kreativer, synthetischer Prozeß. Realiter wird es sich bei den Informationsprozessen der Logistik jedoch immer um eine Kombination aus der Mustererkennung und Detailanalyse handeln.

4. *These von der Bedeutung der Mustererkennung für die Modellierung von Logistiksystemen*

Die Modellierung von Logistiksystemen, beispielsweise für die Anwendung von Simulationsverfahren, setzt die Abbildung der wesentlichen Systemparameter voraus. Genau hier setzt die Mustererkennung an. Da sich Muster jedoch ändern können und zudem die Mustererkennung von dem Standpunkt des Betrachters, zum Beispiel dem Zweck der Modellbildung, abhängt, sind Modelle stets als Episoden (Kirsch et al., 1979: Episodenkonzept) im Beziehungsnetz der Logistik zu verstehen. Vor dem Hintergrund holistischer Denkweisen erscheint die Anwendung mikroskopischer Perspektiven für Logistikepisoden und makroskopischer Sichtweisen für die vollständige Berücksichtigung des Kontextes zweckmäßig. Typische Muster des ökologieorientierten Logistikmanagements sind Folgewirkungen, die aus dem Verbrauch kumulativknapper Ressourcen resultieren, die Überinanspruchnahme ratenknapper Rohstoffe, Kumulativ- und Langzeitwirkungen von Umweltbelastungen u. a. m.

Die EDV eignet sich primär für die Erfassung der quantitativen Dimension von Komplexität. Ihr Beitrag zur Mustererkennung ist vergleichsweise klein. Andererseits kann die Anwendung computerge-

stützter multivariater Analysemethoden der Statistik Unterstützungsleistung für das Eruiieren der Verhaltensmuster von Systemen bieten. Und auch die sich in Ansätzen befindliche Künstliche Intelligenz verspricht das Potential der EDV zur Mustererkennung deutlich steigern zu können.

III Handhabung komplexer Ökologiephänomene aus evolutionstheoretischer Sicht

5. These von der Übertragbarkeit bzw. Anwendbarkeit der Evolutionstheorie auf die Logistik

Die Evolutionstheorie beschäftigt sich mit der Dynamik komplexer Systeme. Sie kennzeichnet kein geschlossenes Aussagesystem, sondern umfaßt ein heterogenes Bündel evolutionstheoretischer Ansätze. Allen evolutionstheoretischen Ansätzen gemein ist vor allem die Beschäftigung mit dem sogenannten 'evolutionstheoretischen Prinzip', welches die Fähigkeit von Systemen beschreibt, sich durch bestimmte Wirkungsmechanismen an unvorhergesehene Veränderungen ihres Umfeldes in höchst wirkungsvoller Art und Weise anzupassen (Malik, Probst, 1981). Folgendes zweistufiges Vorgehen zeigt sich im Zusammenhang mit dem Bezug evolutionstheoretischer Ansätze für die Logistik zweckmäßig: Zunächst sind in einem ersten Schritt die für die Logistik grundsätzlich geeigneten evolutionstheoretischen Ansätze zu klassifizieren. Wird die Logistik als ein zielgerichtetes soziales System verstanden, kann auf jene Ansätze zurückgegriffen werden, die bereits für Organisationen, d.h. zielgerichtete soziale Systeme im allgemeinen erarbeitet wurden. Die Übertragung evolutionstheoretischer Aussagen sogenannter Grundlagenwissenschaften, wie zum Beispiel der Biologie, Psychologie und Physik, ist dabei von der Anwendung der Aussagen sogenannter Metawissenschaften wie die Kybernetik und Systemtheorie (i.w.S.) zu differenzieren. In Hinblick auf die Form der Verbindung evolutionstheoretischer Erkenntnisse mit den Bereich der Organisation lassen sich vor allem die Isomorphie, die Analogie, die Metapher und das Axiom unterscheiden (Sammel, 1984). Die verschiedenen evolutionstheoretischen Ansätze der Organisationslehre lassen sich im weiteren danach systematisieren, ob sie sich primär auf die Betrachtungsebene der Branche, Unternehmung, auf Unternehmensbereiche (Logistik etc.) oder Individuen (Logistikmitarbeiter) beziehen (Abb. 2). Ferner erscheint eine Zuordnung nach der Frage zweckmäßig, ob sich die Ansätze eher auf den Prozeß der Komplexitätswahrnehmung (wahrgenommene Komplexität) oder -handhabung (tatsächliche Komplexität) beziehen. Die Wahrnehmung und Handhabung von Komplexität ist allerdings insofern im Zusammenhang zu sehen, als zum einen die Wahrnehmung der Systemkomplexität, speziell die Mustererkennung, auf den Erfahrungen aufbaut, die das Logistikmanagement durch die Komplexitätshandhabung gewinnt. Andererseits ist die Erfassung der Komplexität des Logistiksystems die Grundvoraussetzung für dessen Handhabung.

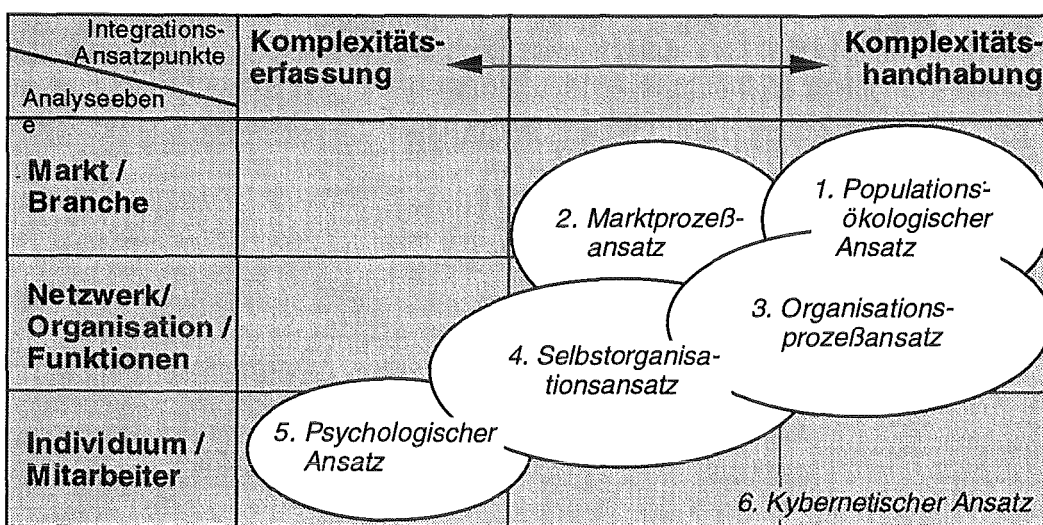


Abb. 2: Systematisierung ausgewählter evolutionstheoretischer Ansätze der Organisationslehre (Göpfert, Wehberg, 1995)

Der Bezug obiger evolutionstheoretischer Ansätze der Organisationslehre für die Logistik erfolgt in einem zweiten Schritt. Versteht man die Logistik als ein offenes und komplexes System, so ist die

isomorphe Verbindung evolutionstheoretischer Gesetzmäßigkeiten mit der Logistik ebenso prinzipiell zulässig wie die Übertragung evolutionstheoretischer Inhalte in Form der Analogie, der Metapher und des Axioms. Der 'Brückenschlag' zwischen der Evolutionstheorie und der betriebswirtschaftlichen Logistik stellt sich im ersteren Fall über die Systemtheorie ein. Von der evolutionstheoretischen Organisationslehre ausgehend handelt es sich allerdings streng genommen lediglich um die Anwendung von Konzepten, die bereits für den weiter gefaßten Bereich der Organisation 'fruchtbar' gemacht wurden. Im Zuge dieser Anwendung sind die Besonderheiten des Logistikmanagements (Göpfert, Wehberg, 1994), z.B. der Sekundärleistungscharakter der Logistik, zu berücksichtigen. Als Ergebnis können dann spezifische gestalterische Aussagen von evolutionstheoretischen Ansätzen der Organisationslehre für das Logistikmanagement abgeleitet werden.

6. These von dem Gestaltungsgehalt der Populationsökologie für die Logistik

Der Population Ecology-Ansatz (Hannan, Freeman, 1977) bzw. die Populationsökologie kennzeichnet den Versuch, evolutionsbiologisches Wissen auf den Gestaltungsbereich ganzer Klassen von Organisationen durch Analogiebildung zu übertragen. Die wichtigsten Vertreter der Populationsökologie (Aldrich, 1979, Hannan, Freeman, 1977, Kaufman, 1975, McKelvey, 1982) beschäftigen sich vor allem mit den Mechanismen der Evolution und der Taxonomie sogenannter Populationen (Simmel, 1984). Die Population kennzeichnet eine Gruppe von Organisationen, die zur Gewährleistung ihres Existenzzieles über weitestgehend ähnliche Grundfähigkeiten, sogenannte Comps, verfügen. Der Genpool umfaßt dabei alle Comps einer Organisation. Aufgrund des vergleichbaren, aber nicht gleichen Genpools der Mitglieder einer Population sind die sich hieraus ableitenden Erscheinungsformen, die als Phänotypen bezeichnet werden, ebenfalls einander ähnlich, jedoch nicht identisch. Gerade die Unterschiede zwischen den einzelnen Organisationsformen erlauben das Überleben der Population als Ganzes im Rahmen einer dynamischen Umwelt. So ist davon auszugehen, daß der Teil der Umwelt, der selbst durch die Population oder einzelne Organisationen beeinflusst werden kann, die sogenannten Nischen, vergleichsweise klein ist. Zudem ist der Informationsstand der einzelnen Organisation in der Regel unvollständig (Hannan, Freeman, 1984). Die Evolution der einzelnen Organisation verläuft mithin 'blind', d.h. weitestgehend ungeplant und stochastisch. Deutlich wird das der Populationsökologie eigene Vokabularium (McKelvey, 1982).

Bei dem Evolutionsverständnis der Populationsökologie handelt es sich um eine quasi doppelte Definition, der Evolutionprozeß findet sowohl auf einer genotypischen als auch phänotypischen Ebene statt (McKelvey, 1982). Die Evolution des Genotyps steuert tendenziell, vergleichbar zu einer 'Sickergrube' in der einzelne Ausprägungen aus der sich oszillierend in Bewegung befindlichen Häufigkeitsverteilung der Genotypen zu einer Häufigkeitsverteilung der Phänotypen führen, die Entwicklung des Phänotyps vor. Aus prozeßorientierter Perspektive läßt sich die Evolution als ein Wechselspiel zwischen den Mechanismen Variation, Selektion und Bewahrung verstehen (Kaufman, 1975). Die Variation umfaßt drei Grundformen, die fehlerhafte oder zufällige Veränderung bei der Übertragung von Comps und Strukturen, Lernprozesse und Neugründungen von Organisationen (Aldrich, 1979). Die Selektion konkretisiert sich durch die externe Auswahl effektiver Typen über die Anforderungen der Umwelt oder durch die interne Selektion vermutlich effektiver Typen durch das Management (Aldrich, Pfeffer, 1976). Im weiteren wird die Bewahrung bzw. Retention in Form der Tradition, d.h. einer Weitergabe bewährter Typen an nachfolgende Organisationsmitglieder oder in Gestalt der Diffusion, also einer Verbreitung effektiver Typen realisiert (McKelvey, Aldrich, 1983). Dabei beziehen sich die Bewahrungsformen primär auf die Kernfähigkeiten, d.h. den Genpool der Organisation. Die Bewahrung ist schließlich, wie die soeben genannten Evolutionsmechanismen überhaupt, vor dem Hintergrund eines wettbewerblichen Umfeldes (McKelvey, 1982) zu sehen (Abb. 3).

Die Anwendung populationsökologischer Grundlagen der Organisationslehre auf den Bereich der betriebswirtschaftlichen Logistik läßt die im folgenden skizzierte Sichtweise zulässig erscheinen: Die Betrachtung ganzer Klassen von Logistiksystemen steht hier im Vordergrund. Streng genommen, wäre demnach die Anwendung auf Logistikdienstleister, beispielsweise auf den Expressmarkt, zu begrenzen. Darüber hinaus erscheint der Beizug der Populationsökologie für Industrie und Handel zulässig, sofern er kritisch reflektiert wird und man berücksichtigt, daß die Klassen von Logistiksystemen in diesem Zusammenhang lediglich einen Teil ganzer Klassen von Organisationen ausmachen (bspw. die Logistiksysteme der Automobilindustrie). Aus populationsökologischer Sicht machen dann alle flußbezogenen Kernfähigkeiten (Weber, Kummer, 1994) zusammen den Genpool der Logistik aus und stellen einen integrierten Bestandteil des Genpools der betrachteten Organisation bzw. des Unternehmens dar. Die sich aus dem jeweiligen Genpool entwickelnden Logistikstrukturen, also

die Phänotypen speziell der Logistik, gleichen sich innerhalb einer gegebenen Population weitgehend. Die Evolution sowohl des Logistik-Geno- als auch -Phänotyps steht in engem Zusammenhang mit der Umwelt des Logistiksystems. Letztere umfaßt sowohl die übrigen Funktionsbereiche der Organisation (Marketing, Produktion u.a.) als auch die organisationsexterne Umwelt. Da der Einfluß der Logistik auf deren Umwelt, z.B. im Hinblick auf eine logistikgerechte Produktgestaltung durch das Marketing oder die Etablierung von Verpackungsstandards durch Logistikanbieter, begrenzt ist, verläuft die Evolution von Logistiksystemen mehr oder weniger ungeplant bzw. 'blind'. Folgerichtig kann in diesem Zusammenhang, obwohl dies das ursprüngliche Begriffsverständnis der Populationsökologie deutlich erweitert, eine Differenzierung der Begriffe einer 'organisationsinternen Logistikkniche' von dem einer 'organisationsexternen Logistikkniche' konstruiert werden. Unter Berücksichtigung des Querschnittcharakters der Logistik (Pfohl, 1994) und ihrer steigenden Attraktivität (Weber, Kummer, 1994) wird dabei die organisationsinterne Nische vermutlich zunehmend breiter ausfallen. Angenommen werden darf ferner, daß es logistikspezifische Evolutionstreiber, d.h. Variations-, Selektions- und Bewahrungsmechanismen gibt. So stellt sich beispielsweise der Aufbau eines neuen Logistiksegments, etwa von Distributionskanälen, zumindest als 'teilweise Neugründung einer Organisation' dar. Die Intensität der Evolution von Systemen der Unternehmenslogistik hängt schließlich aufgrund des Sekundärleistungscharakters (Göpfert, Wehberg, 1994) der Logistik vor allem von dem Ausmaß ab, in dem ein Sekundärleistungswettbewerb geführt wird. Und auch der Markt logistischer Dienstleistungen entwickelt sich umso eher weiter je höher die Wettbewerbsdichte dieser Branche sowie die Umfeldynamik im allgemeinen ausfällt. So kann aus der Sicht der Populationsökologie etwa der Trend der Güterverkehrsbranche in Richtung kombinierter Verkehre und Mehrweg-Transportverpackungen als Ergebnis eines höheren Umweltbewußtseins von Verladern (Göpfert, Wehberg, 1995) verstanden werden. Speziell die ökologieorientierte Logistik evolviert zudem umso eher, je intensiver der 'Kampf' um natürliche Rohstoffe wie Wasser, Luft und Boden ist.

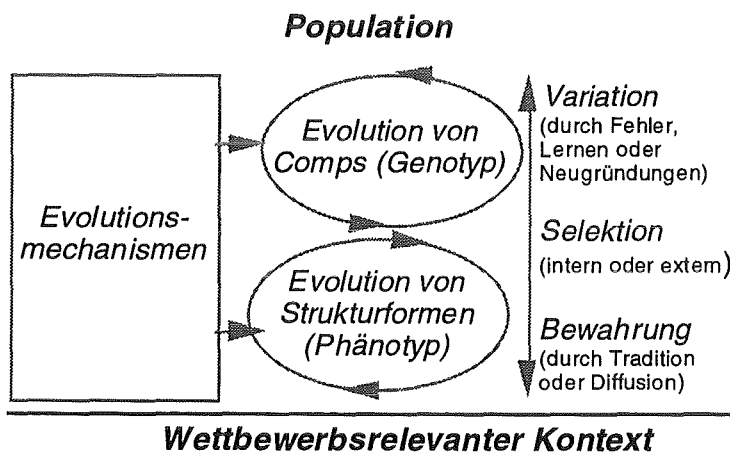


Abb. 3: Grundbausteine der Populationsökologie

Aufbauend auf einer derartigen Betrachtungsweise des Logistikmanagements bietet die Populationsökologie insbesondere die folgenden Gestaltungshilfen: (a) Die Populationsökologie offeriert eine neuartige theoretische Perspektive, welche die Evolution ganzer Gruppen von Logistiksystemen in Abhängigkeit von der Evolution ihrer Umwelt, vor allem der organisationsexternen Umwelt, in den Mittelpunkt rückt. (b) Der Begriff der Population korrespondiert wohl am ehesten mit dem der Branche (McKelvey, Aldrich, 1983). Die Branchenbetrachtung kommt dabei gerade Logistikpraktikern sehr entgegen. (c) Trotz der Tatsache, daß sich die Populationsökologie hier auf die Evolution ganzer Gruppen von Logistiksystemen konzentriert, bezieht sie Inhalte, die die Entwicklung einzelner Logistiksysteme betreffen insoweit mitein, als sie für die Evolution der betrachteten Population eine Rolle spielen. Bei den Aussagen, die sich hinsichtlich der Entwicklung einzelner Logistiksysteme aus der Populationsökologie ableiten lassen, handelt es sich damit um Musteraussagen. Es sind Gestaltungsprinzipien, die eine wahrscheinlich hohe Effektivität bzw. Fitness logistischer Systeme versprechen. (d) Die populationsökologische Perspektive betont des weiteren die Tatsache, daß die Möglichkeiten einer aktiven, bewußten Einflußnahme durch das Logistikmanagement begrenzt sind. Sie beschränken sich im wesentlichen auf die Gestaltung der Evolutionsmechanismen, insbesondere auf die Gewährleistung eines ausgeglichenen Verhältnisses zwischen Variations- und Selektionsmechanismen der Logistik. (e) Die hohe wettbewerbstrategische Bedeutung des Lernens für Organisationen und Logistiksysteme im besonderen läßt sich im Zusammenhang mit der Populationsökologie auf

dessen wichtige Rolle als Variationstreiber zurückführen. (f) Kritisch zu sehen ist, daß es insbesondere an einer empirischen Überprüfung der populationsökologischen Aussagen über Logistiksysteme fehlt. (g) Kritisch zu beurteilen ist auch das zum Großteil sehr hohe Abstaktionsniveau der Handlungsregeln, die die Vertreter der Populationökologie ableiten und das damit auch bei der Anwendung einschlägiger Aussagen auf die Logistik zum tragen kommt, sowie die Tatsache, daß sich die Populationsökologie ausschließlich die Frage nach der Zweckmäßigkeit von Logistikstrukturen in Abhängigkeit von dem Umweltzustand stellt. Die Sinnhaftigkeit manageriellen Handelns der Logistik wird aus der Betrachtung ausgeschlossen.

7. These von dem Gestaltungsgehalt des Organisationsprozeßansatzes für die Logistik

Der sogenannte Organisationsprozeßansatz (- nicht zu verwechseln mit dem hier ebenfalls verwendeten Begriff der Organisationslehre -) faßt eine Gruppe von Wissenschaftlern (Bigelow, Dyllick, Röpke, Zammuto) zusammen, die im Rahmen ihrer zahlreichen Veröffentlichungen bemüht sind, schwerpunktmäßig die Prozesse, die innerhalb von Organisationen ablaufen, durch die Übertragung evolutionstheoretischer Erkenntnisse zu beleuchten (Simmel, 1984). Anders als die Populationsökologie, welche direkt auf evolutionsbiologischen Grundlagen fußt, basieren sie weitestgehend auf der soziokulturellen Evolutionstheorie (Campbell, 1975). Letztere zeigt sich allerdings in Ansätzen durchaus durch die Biologie beeinflusst. Folglich ist der Organisationsprozeßansatz der Evolutionstheorie indirekt auch durch evolutionsbiologische Grundlagen geprägt. Vergleichbar zu der populationsökologischen Betrachtung ist hingegen, daß sich auch der Organisationsprozeßansatz schwerpunktmäßig mit der Komplexitätshandhabung beschäftigt (Abb. 2). Kognitive Zwischenschritte einer Komplexitätswahrnehmung werden zum Teil sogar gänzlich ausgeschlossen (Bigelow, 1978). Zudem repräsentiert auch der Organisationsprozeßansatz eine 'mechanistische', d.h. in diesem Zusammenhang die Mechanismen des Evolutionsprozesses umfassende Perspektive (- mechanistisch also nicht im Sinne von 'linear-konstruktivistisch', 'voluntaristisch', 'der Beherrschbarkeitsillusion erliegend'). Der grundsätzliche Mechanismus der Evolution wird dabei regelmäßig in Form einer Isomorphie auf die Organisation übertragen (Dyllick, 1982, Röpke, 1977, Zammuto, 1982). Im Hinblick auf über diesen Mechanismus hinausgehende Aussagen werden die speziellen Unterschiede zwischen soziokulturellen bzw. gesellschaftlichen Systemen und Organisationen jedoch berücksichtigt. Speziell Bigelow wählt das Axiom als Übertragungsform (Bigelow, 1978).

Im Zentrum des Organisationsprozeßansatzes steht das Bemühen um ein möglichst tiefes Verständnis über die drei Mechanismen der Evolution innerhalb sozialer Systeme (Simmel, 1984). Versteht man Bigelow (1978) als den Hauptrepräsentanten des Organisationsprozeßansatzes, dann lassen sich vor allem folgende Kernelemente dieser speziellen Evolutionstheorie anführen (Abb. 4): Der Evolutionsprozeß des Organisationsprozeßansatzes kristallisiert sich zunächst in Form von Populationen von Varianten, welche als Klassen grundsätzlich einander ähnelnder Elemente zu beschreiben sind, die jedoch bestimmte Unterschiede zueinander aufweisen. Im weiteren steht die interne Selektion im Mittelpunkt der Betrachtung. Sie soll die externe natürliche Auswahl über geeignete Kriterien stellvertreten und entsprechende Hinweise vor allem über den späteren Markterfolg geben. Ein weiterer Kernbestandteil des Organisationsprozeßansatzes ist schließlich die Exploration von Methoden und Instrumenten für die Variation, aber auch Bewahrung ausgewählter Populationen von Varianten.

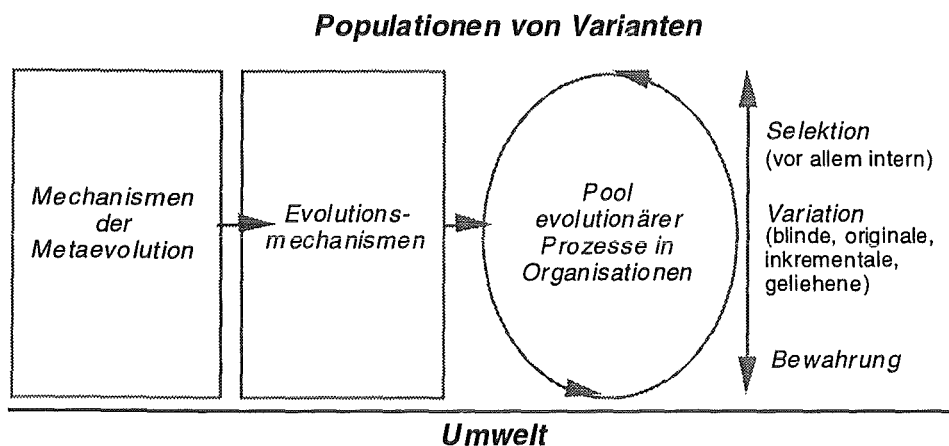


Abb. 4: Grundbausteine des Organisationsprozeßansatzes

Die Besonderheit des Organisationsprozeßansatzes besteht nun vor allem darin, daß er das Evolutionsphänomen bei weitem nicht in dem Maße auf bestimmte Sachverhalte eingeschränkt verstehen will, wie beispielsweise die Populationsökologie, die sich im wesentlichen auf die Geno- und Phänotypen einer Population begrenzt. So umfaßt er grundsätzlich alle Ebenen (Organisation als Ganzes, Subsysteme, Gruppen, Individuen) und Arten von Populationen von Varianten (Verhaltensweisen, Ideen, Personen, Artefakte etc.). Auch von der Tatsache, daß die Hauptvertreter des Organisationsprozeßansatzes innerhalb dieses prinzipiell zulässigen Anwendungsfeldes bestimmte Schwerpunkte setzen, so konzentriert sich beispielsweise Röpke (1977) auf die Evolution von Ideen bzw. Innovationen über alle Ebenen und Bigelow (1978) auf die Evolution von Verhaltensweisen innerhalb organisatorischer Subsysteme, bleibt diese Besonderheit unberührt. Das Kernanliegen des Organisationsprozeßansatzes besteht mithin in der Untersuchung evolutionärer Prozesse in Organisationen hinsichtlich ihrer Lenkbarkeit. Mit anderen Worten interpretiert der Organisationsprozeßansatz die Veränderung eines Pools von Ideen, Personen, Praktiken u.a.m. aus einer Population von Varianten als Folge des Zusammenspiels von Variation, Selektion und Bewahrung (Sammel, 1984).

In diesem Sinne vertritt Bigelow (1978) die Auffassung, daß die interne Selektionsfunktion rational ausgeübt wird und, anders als beispielsweise bei der Populationsökologie, der Variation und Bewahrung von Praktiken vorgeschaltet ist. Folgerichtig werden Praktiken, die den naturgegebenen Anforderungen einer realen Umwelt nicht gewachsen sind, nicht automatisch eingestellt. Im weiteren systematisiert Bigelow vier Quellen, die zusammen dafür verantwortlich zeichnen, daß eine breite Population von Varianten innerhalb von Subsystemen einer Organisation besteht. Dies sind blinde, originale, inkrementale und geliehene Variationen, wobei Bigelow auf die Vorteilhaftigkeit letzterer beider im Hinblick auf komplexe Verhaltensweisen hinweist. Die Beanspruchung dieser verschiedenen Variationsformen hängt allerdings auch davon ab, wie die bestehenden Varianten anhand der internen Selektionskriterien evaluiert werden. Hinsichtlich der Bewahrung hebt Bigelow drei Besonderheiten hervor: Zum einen ist das Zusammenspiel zwischen Selektion und Bewahrung stochastischer Natur. Bestimmte Praktiken setzen sich also erst aufgrund einer kumulierten Mehrzahl positiver Beurteilungen durch. Vor diesem Hintergrund kann zweitens der Entscheid über die Beibehaltung oder Auswahl einer bestimmten Verhaltensweise als ein mehrere Ebenen umfassender Interaktionsprozeß gesehen werden. Und drittens wird hervorgehoben, daß ein ausgeprägtes Bewahrungstreben stets in einem Spannungsverhältnis zu dem Willen steht, möglichst viele Varianten zu erzeugen. Schließlich weist Bigelow darauf hin, daß die Evolution sozialer Systeme im Zusammenhang mit der Entwicklung ihrer gesellschaftlichen Umwelt zu sehen ist. Insbesondere wird die Notwendigkeit einer Synchronisation der Geschwindigkeiten der Evolution von System und Umwelt, anders als bei der Populationsökologie, verstärkt hervorgehoben.

Die Grundüberlegungen Bigelows finden im Rahmen der Arbeiten der weiteren Vertreter des Organisationsprozeßansatzes ähnlich für andere Arten von Populationen von Varianten und andere Betrachtungsebenen ihre Anwendung. Sie werden zum Teil ergänzt und zum Teil modifiziert. Sie münden alsdann in einem Managementverständnis, welches die Notwendigkeit einer indirekten Interventionsstrategie in bezug auf die Evolution von Organisationen hervorhebt. Denn direkte Eingriffe des Managements laufen Gefahr, von den bestehenden Evolutionsmechanismen unmittelbar ausgestoßen zu werden. Demgegenüber bieten die Gestaltung von Evolutionsmechanismen sowie die Gestaltung von Mechanismen zur Entwicklung von Evolutionsmechanismen Ansatzpunkte, der weitgehenden 'Blindheit' des Evolutionprozesses gerecht zu werden. Folgerichtig ist gerade den Kriterien für die interne Selektion von Mechanismen der Evolution und Metaevolution besondere Aufmerksamkeit von seiten der Managementlehre zu schenken. Neben der soeben angesprochenen Synchronisation des Evolutionsprozesses von System und Umwelt rückt hier die notwendige zeitliche Abstimmung zwischen Mechanismen der internen Selektion und den Populationen von Varianten (Sammel, 1984).

Der Beizug des oben beschriebenen Organisationsprozeßansatzes der evolutionstheoretischen Organisationslehre für die Logistik führt zu folgendem Konzeptionsbild: Ziel ist es, ein möglichst tiefes Verständnis über die Evolutionsmechanismen des Logistiksystems zu gewinnen. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen hier Populationen von Varianten der Logistik. Damit sind ebenso bestimmte Verhaltensweisen (Dispositionspraktiken, Lagerhaltungsprinzipien usw.), Ideen (Prozeßinnovationen, Transport- und Umschlagstechnologie etc.), Mitarbeiter (Motivation, Teamwork u.a.) und Artefakte der Logistik angesprochen wie die Logistikfunktion als Ganzes (Logistiksegmente), als Teil der Unternehmung und als Teil eines vergleichsweise geschlossenenen Wertschöpfungssystems. Da die Entwicklung derartiger Populationen von Logistikvarianten eher blind verläuft und es deshalb einer entsprechenden Variantenvielfalt bedarf, rückt der Interventionsschwerpunkt des Logistikmanagements tendenziell auf die Ebene des Logistik-Controlling, wenn nicht gar -Meta-Controlling (Abb. 5). Nicht die Anpassung oder Innovation von Logistikstrukturen, sondern die Fähigkeit des Logistikmanagements zur Anpassung und Innovation, die sogenannte Metakompetenz, steht hier im Mittelpunkt.

Aus dem selben Grund verschiebt sich vermutlich der Fokus des Logistikmanagements von operativen Inhalten hin zu normativen. Die Ausgestaltung der internen Selektion im Logistiksystem wirft im weiteren die Frage nach den Effektivitätskriterien dieser internen Selektion auf. Ist dabei die Effektivität logistischer Prozesse und Strukturen vergleichsweise hoch, so bedient sich das Logistikmanagement primär der inkrementalen und geliehenen Variation. Eine geringe Logistikeffektivität stößt demgegenüber eher Prozesse originaler Variationen in der Logistik an. Speziell die Effektivität der Evolutionsmechanismen der Logistik hängt des weiteren von den genauen Inhalten der evolvierenden Populationen logistischer Varianten ab. Der stochastisch geprägte Zusammenhang zwischen Selektion und Bewahrung sowie der damit in Verbindung stehende Interaktionsbezug des Selektionsentscheids werden ferner der Tatsache besonders gerecht, daß aufgrund der Querschnittsfunktion der Logistik Logistikentscheidungen in der Regel von einer Mehrzahl von Subsystemen einer Organisation, beispielsweise dem Marketing, der Produktion der F&E u.v.m., zu tragen sind. Sie korrespondieren vermutlich mit einer relativ offenen Logistikkultur (Wehberg, 1994). Schließlich bietet der Organisationsprozeßansatz aufgrund seiner dynamischen Anlage, d.h. durch die Hervorhebung der Notwendigkeit einer Synchronisation verschiedener Evolutionsprozesse, grundsätzlich ein geeignetes evolutionstheoretisches Fundament für die Konzeption der Logistikentwicklung, insbesondere der ökologieorientierten Logistikentwicklung (Wehberg, 1994, Göpfert, Wehberg, 1996).

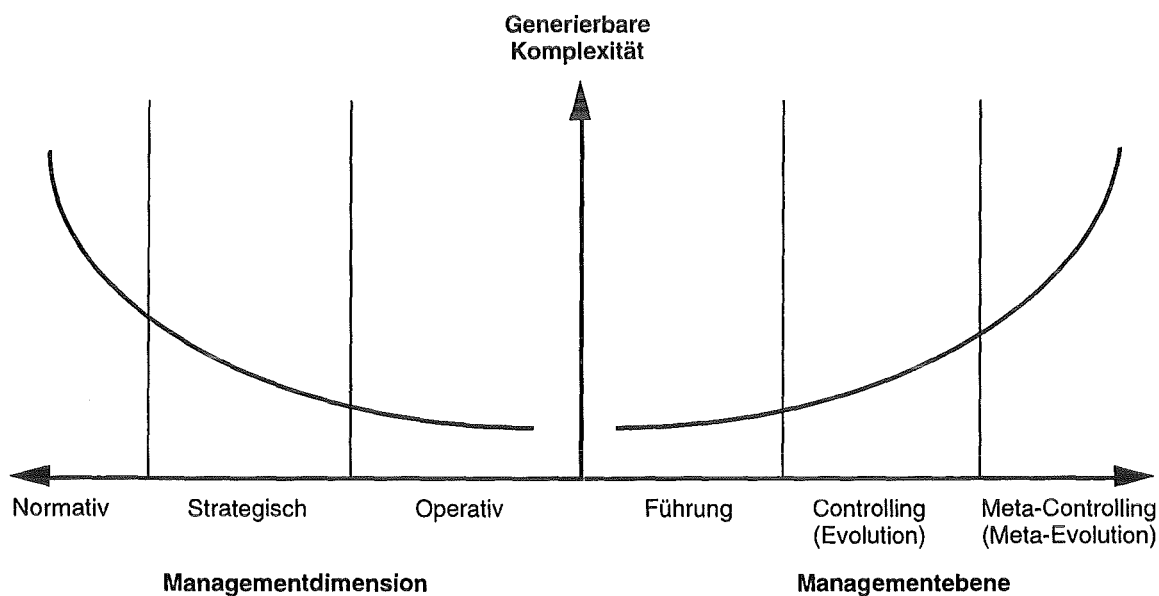


Abb. 5: Zusammenhang zwischen Managementebene bzw. -dimension und generierbarer Komplexität

Die Einbindung logistischer Aufgabenstellungen in die Perspektive des Organisationsprozeßansatzes erscheint nicht nur naheliegend, weil sie eine neuartige Sichtweise in der Form bietet, daß die Logistik als ein komplexes Beziehungsnetz vielschichtiger und auf verschiedenen Ebenen miteinander vernetzter Evolutionsströme interpretiert wird. Sie zeigt hiervon ausgehend auch einige gestalterische Ansatzpunkte auf. Dabei handelt es sich um Musteraussagen über die 'Richtigkeit' von Logistikvarianten, d.h. um Gestaltungsprinzipien, die eine wahrscheinlich hohe Logistikeffektivität versprechen. Aus der Perspektive der Anwendungsorientierung sind allerdings auch nicht wenige unbehandelte Problemstellungen zu erkennen. So wird sich speziell dem Logistikpraktiker die Frage nach dem 'Wie?' einer konkreten Ausgestaltung der Evolutionsmechanismen unterschiedlicher Interventionsebenen des Logistikmanagements aufdrängen. Vor allem in bezug auf das erforderliche Gleichgewicht zwischen der Variation und Bewahrung logistischer Varianten sind hier entsprechende Möglichkeiten aufzuzeigen. Im weiteren ist kritisch anzumerken, daß die Betrachtung höherer Interventions- bzw. Managementebenen durchaus in sophistizierenden Übertreibungen münden kann, wenn sie nämlich zu einem solchen Abstraktionsniveau führt, das im Bereich des Nicht-Mehr-Vorstellbaren und Realitätsfernen liegt. Nimmt man in diesem Zusammenhang an, daß Interventionen auf höheren Managementebenen (Meta-Controlling) nur längerfristig entsprechende Varianten auf niedriger Ebene (Führung) generieren können, wovon beispielsweise Semmel (1984) ausgeht, und unterstellt man zudem einen exponentiell wachsenden Zeitbedarf mit der Inanspruchnahme höherer Managementebenen (Probst, 1981), so bedeutet dies m.E. in letzter Konsequenz, daß ein ähnliches Dilemma, wie es durch Bleicher's Zeitschere (Abb. 1) beschrieben wird und welches als 'Zeitschere zweiter Ord-

nung' (Abb. 6) zu bezeichnen wäre, zum tragen kommen kann. Anders als bei Bleicher (1991), der das mit der Zeitschere beschriebene Dilemma auf die konstruktivistische Anlage bisheriger Managementverständnisse zurückführt, basiert die mit der Zeitschere zweiter Ordnung beschriebene Diskrepanz auf einem evolutionstheoretisch fundierten Managementkonzept. Hier wird jedoch die Auffassung vertreten, daß bis dato Interventionen höherer Ordnung grundsätzlich rechtzeitig das Verhalten eines sozialen Systems beeinflussen können. Schließlich fehlt es im Zusammenhang mit der Anwendung des Organisationsprozeßansatzes für die Logistik an einer empirischer Fundierung entsprechender Gestaltungsprinzipien.

8. These von dem Gestaltungsgehalt der Kybernetik für die Logistik

Ein fundamentaler Bestandteil der Kybernetik zweiter Ordnung, die sich mit Ungleichgewichtssystemen aus regelkreistheoretischer Sicht beschäftigt, ist das Gesetz der erforderlichen Varietät (Ashby, 1956): "Only variety can destroy variety". Danach stellt sich die Mindestvarietät des Zielerreichungsgrades o eines betrachteten Systems als der Quotient aus der Varietät eines Einfluß nehmenden Umsystems d und der Varietät r , die das betrachtete System dem Umsystem entgegensetzen kann, dar, vorausgesetzt, daß für das betrachtete System zur Erreichung seiner Ziele bei jeder Veränderung des Umsystems eine Anpassung erforderlich ist: $o \geq d / r$. Die Varietät kann dabei als ein Maß für die konkrete Ausprägung der Systemkomplexität verstanden werden.

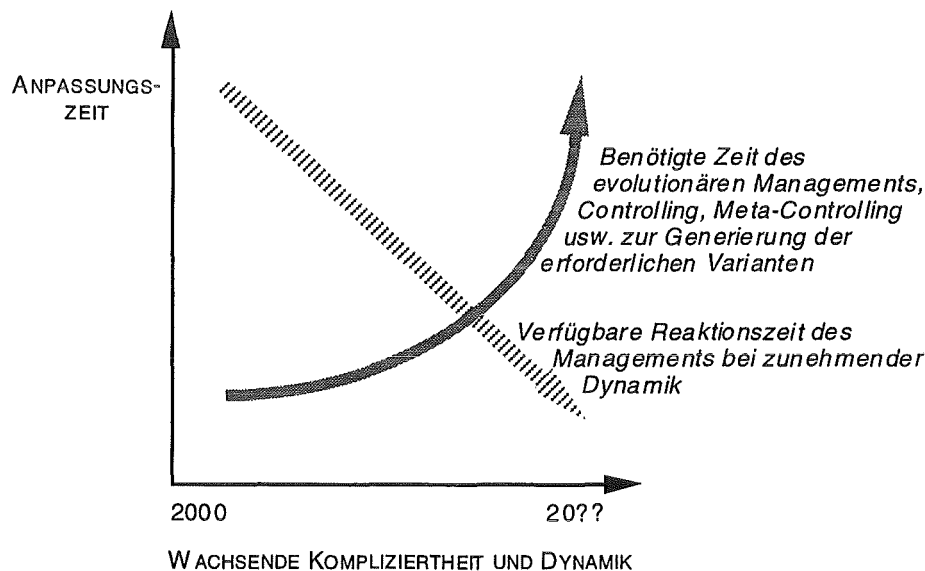


Abb. 6: Zeitschere zweiter Ordnung

Aus dem Gesetz der erforderlichen Varietät kann geschlußfolgert werden, daß ein Logistiksystem nur dann beherrscht werden kann, wenn die Varietät des lenkenden Systems, d.h. des Logistikmanagements mindestens so hoch ist wie die des gelenkten Systems, also vor allem der Anforderungen von Anspruchsgruppen der Logistik. Folgerichtig steuert das Varietäts- bzw. Komplexitätsgefälle zwischen Logistikin- und -umsystem das Ausmaß, in dem die Logistik beherrscht oder nur gehandhabt werden kann, und damit auch die wahrscheinliche Logistikeffektivität vor (Abb. 7). Über die Handhabbarkeit respektive Beherrschbarkeit des Gesamtsystems entscheidet allerdings nicht nur die Varietät logistikrelevanter Variablen an sich (quantitative Dimension). Vielmehr kommt es auch auf die konkreten Inhalte der Veränderungsmöglichkeiten an (qualitative Dimension). Die jeweiligen Erscheinungsformen von Logistikin- und umsystem müssen inhaltlich zueinander passen. Zu beachten ist, daß die absolute Beherrschung eines Logistiksystems in der Mehrzahl der Fälle unmöglich ist (hierzu allgemein Luhmann, 1990). Zudem kann es durchaus rationalen, wirtschaftlichen Überlegungen entsprechen, die Varietät des Logistikmanagements zu begrenzen. Hier stehen Opportunitätskosten der Veränderung Flexibilitätsgewinnen gegenüber (Wehberg, 1994). Letztere Effizienzüberlegungen stehen dann einer möglichst hohen Logistikeffektivität entgegen. Zur Lösung dieses trade offs wird deswegen kein minimales, sondern ein ausgeglichenes Komplexitätsgefälle sowie kein maximales, sondern ein (wahrscheinlich) zufriedenstellendes Effektivitätsniveau angestrebt.

Verändert sich das Logistikumsystem im Zeitablauf und paßt sich das -insystem entsprechend an, kommt es zum sogenannten Fließgleichgewicht. In diesem Zusammenhang unterscheidet die Kybernetik sogenannte negative und positive Rückkopplungen (Sprüngli, 1981). Während negative Rückkopplungen stabilisierend wirken und damit Gleichgewichtssituationen fördern, initiieren positive Rückkopplungen Veränderungen in Form von Ungleichgewichten. Realiter ist jedes soziale System, wie auch die Logistik, als eine Synthese vielschichtiger positiver und negativer Rückkopplungen zu verstehen, die im Laufe der Zeit mal mehr, mal weniger zum tragen kommen und regelmäßig ins Fließgleichgewicht führen. Gerade die Möglichkeit, entsprechende Rückkopplungsmechanismen zu beeinflussen, bietet dabei Ansatzpunkte für die Lenkung eines Logistiksystems im Sinne des Varietätsgesetzes. Diese Lenkung kann grundsätzlich in Form homöostatischer, ultrastabiler und multistabiler Systeme erfolgen, wobei zu beachten ist, daß das lenkende System letztenendes auch immer Teil des gelenkten Systems ist (Probst, 1981). Die homöostatische Lenkung in Form einer einfachen Regelung korrespondiert mit einem Managementverständnis, das lediglich die Ebene der Führung inbegrift. Folgerichtig beinhaltet sie lediglich negative Rückkopplungsmechanismen, die ein Gleichgewicht abzusichern versuchen. Ultrastabile Strukturen entsprechen demgegenüber einem Aufgabenverständnis, wie es sich aus Führung und Meta-Führung, d.h. Controlling gemeinsam ergibt. Sie umfassen die Möglichkeit, bei Störungen, die eine vorhandene Reglerkapazität überschreiten, neue Regelungsmechanismen zu installieren, und erlauben insofern sowohl positive als auch negative Rückkopplungen. Während ultrastabile Strukturen die Anpassung des geregelten Systems als Ganzes zum Gegenstand haben, kennzeichnet ein zwar vom Prinzip her gleicher Regelungsmechanismus, der jedoch eine Differenzierung des Gesamtsystems in Teilsysteme vornimmt, die multistabile Struktur. Gerade die weitgehende Unabhängigkeit der Lenkung von untereinander kommunizierenden Teilsystemen steigert dabei die Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems. Hinsichtlich des Managementverständnisses findet die multistabile Lenkung ihren Ausdruck in der Bildung verschiedener Bereichskonzeptionen, wie dem Lagerhaltungs-, Produktions-, Transport- sowie Standort-Management und -Controlling u.v.m. Deutlich wird, daß sich, vom Standpunkt der Kybernetik aus betrachtet, multistabile Logistiksysteme am ehesten in der Lage sehen, komplexen Phänomenen gerecht zu werden. Dabei sind im multistabilen Regelungszusammenhang Koordinationsformen zu explorieren, die die verschiedenen Beziehungsmuster zwischen den logistischen Subsystemen betreffen.

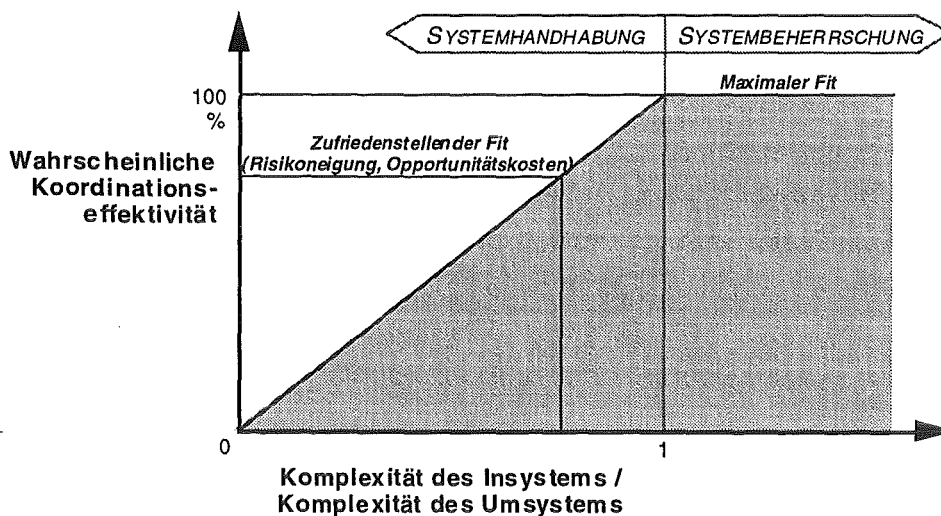


Abb. 7: Zusammenhang zwischen dem Komplexitätsgefälle und der wahrscheinlichen Koordinationseffektivität

9. These vom 'gemeinsamen Nenner' evolutionstheoretischer Ansätze

Die zentrale Variable der Evolution ist die Komplexität (Röpke, 1977). Bei dem evolutionären Management geht es folglich vor allem um das kontextuale Herbeiführen des 'richtigen' Ausmaßes von Komplexität (Wehberg, 1994). Dies kommt in den oben vorgestellten, aber auch weiteren Ansätzen der evolutionären Organisationslehre und Evolutionstheorie im allgemeinen zum Ausdruck (Abb. 8):

So läßt sich in Hinblick auf die Populationsökologie feststellen, daß die Variation von Comps (Genotyp) und Organisationsformen (Phänotyp) mit einer Komplexitätserhöhung, deren Selektion und Bewahrung hingegen mit einer Komplexitätsreduzierung korrespondieren. Die Gewährleistung

des ausgeglichenen Verhältnisses zwischen Variation und Selektionsmechanismen bezieht sich dabei aufgrund des vergleichsweise deterministischen Standpunktes der Populationsökologie - die Einflußmöglichkeiten auf die Umwelt werden eher gering eingestuft - primär auf die Beziehung zwischen den Klassen von Logistiksystemen und dem wettbewerblichen Kontext. Da die Komplexität des wettbewerblichen Umfeldes oszilliert (Konjunktur-schwankungen), pendelt vermutlich auch die Komplexität des Logistiksystems im Zeitablauf zwischen Komplexitätserhöhung und -reduzierung. Ein fast analoges Bild zeigt auch der Organisationsansatz. Auf der Ebene des Controlling korrespondiert die Variation, d.h. die Schaffung neuer Varianten hier mit der Komplexitätserhöhung. Die Selektion und Bewahrung von Varianten implizieren demgegenüber eine Komplexitätsreduzierung. Auf der nächst höheren Managementebene des Meta-Controlling löst sich diese Gleichsetzung allerdings auf. So kann die Variation von Bewahrungs- und Selektionsmechanismen letztendlich die Reduktion der Variantenvielfalt und damit eine Komplexitätsreduzierung zur Konsequenz haben. Umgekehrt mag aus der Konzentration (im Sinne einer Selektion und Bewahrung) auf effektive Variationsmechanismen die Steigerung der Variantenvielfalt des Logistiksystems (Ideen, Praktiken u.a.) und damit eine Komplexitätssteigerung resultieren. Aufgrund des im Vergleich zur Populationsökologie eher voluntaristisch geprägten Selbstverständnisses des Organisationsprozeßansatzes und seiner intraorganisationalen Anlage liegt, wenn es um die Synchronisation verschiedener Evolutionsprozesse geht, der Schwerpunkt des Organisationsprozeßansatzes auf der Harmonisierung der Varianten mit der internen Selektion.

Aus kybernetischer Perspektive entsprechen schließlich die positiven Rückkopplungen komplexitätstreibenden Veränderungen. Negative Rückkopplungen korrespondieren demgegenüber mit einer Stabilisierung von Vorhandenem und wirken komplexitätsreduzierend. Fließgleichgewichte finden dabei in außerordentlichen Schwankungen der Systemkomplexität im Zuge ultra- oder gar multistabiler Logistikstrukturen ihren Niederschlag. Dies bezieht sich sowohl auf inner- (Logistik - Beschaffung - Produktion - Marketing u.a.) als auch auf außerbetriebliche Regelkreise (z.B. Unternehmenslogistik - Konsumenten).

	Komplexitäts- erhöhung	Komplexitäts- senkung
Ashby, 1974	Varietätssteigerung	Varietätssenkung
Bleicher, 1991	Veränderungs- orientierung	Stabilitäts- orientierung
Campbell, 1965	Variation	Preservation, Propagation
Hannan, Freeman, 1977	Variation	Selection, Retention
von Hayek, 1972	Varianten	Wettbewerbliche Auslese, Vervielfachung
zu Knyphausen, 1988	Autopoiese	Allopoiese
Malik, 1984 Sprüngli, 1981 Probst, 1987	Selbstorganisation	Fremdorganisation
Popper, 1973	Versuch	Irrtumsbeseitigung
Wehberg, 1994	Generalisierung Eigenorganisation	Spezialisierung Fremdorganisation

Abb. 8: Gemeinsame Stoßrichtungen ausgewählter evolutionstheoretischer Konzepte

10. These von dem Grundzusammenhang zwischen der Systemkomplexität und der Umweltbelastung

Wird die ökologieorientierte Logistik auf Basis des evolutionstheoretischen Verständnisses (s. These 1) in bezug auf ihren Gestaltungsspielraum untersucht, so stellt sich vor allem die Frage, welcher idealtypische Grundzusammenhang zwischen ihrer Systemkomplexität und dem Umweltschutzpotential (Effektivitätsgröße: 'to do the right things') sowie der Umweltverträglichkeit (Effizienzgröße: 'to do the things right') besteht. Festzustellen ist, daß mit wachsender Komplexität eines (Logistik-) Systems dessen ökonomische Effizienz abnimmt (Abb. 9). Hochstabilisierte Strukturen und Abläufe führen nämlich zu Spezialisierungsgewinnen und Größenvorteilen. Vor dem Hintergrund thermodynamischer Grundlagen (s. nochmals These 2) kann davon ausgegangen werden, daß auch die Umweltverträglichkeit sich umgekehrt proportional zu der Systemkomplexität (der Logistik) verhält (UVK-Muster I). Löst man sich hingegen von der thermodynamischen Perspektive, dann erscheint auch der umgekehrte Fall, daß nämlich die Umweltverträglichkeit mit steigender Komplexität eines (Logistik-) System wächst, plausibel (UVK-Muster II). So zeigt beispielsweise ein (komplexitätstreibendes) Mehrabensystem der Logistik gegenüber einer (komplexitätsreduzierenden) sternförmigen Logistikkonfiguration oftmals deutliche Ökologievorteile. Demgegenüber steigen das Umweltschutzpotential und die Effektivität im allgemeinen zunächst mit steigender Komplexität des (Logistik-) Systems an, um ab einem kritischen Punkt wieder zu sinken. Das geringe Umweltschutzpotential von (Logistik-) Systemen mit maximaler oder auch minimaler Komplexität rührt aus der Überlegung, daß Extrema regelmäßig tödlich für (Logistik-) Systeme sind (Probst, 1987). Bis auf die hier betrachteten Extrema einer minimalen und maximalen Komplexität ist die genaue Lage der Effektivitätsfunktion eines (Logistik-) Systems allerdings keinesfalls festgelegt. Anzunehmen ist vielmehr, daß es hinsichtlich der (Logistik-) Effektivität verschiedene Muster gibt, die jeweils verschiedene typische Verhaltensweisen des (Logistik-) Systems beschreiben.

Obige statische Perspektive ist zweckmäßigerweise durch die dynamische Betrachtung der sich typischerweise oszillierend verhaltenen Fitness von (Logistik-) Systemen zu ergänzen (Göpfert, Wehberg, 1996). In diesem Sinne erfordern Adaptionen an Änderungen des sozialen Umfeldes ebenso wie selbst initiierte Innovationen zunächst eine ausreichende komplexitätserhöhende Veränderungsorientierung, soll die (Logistik-) Effektivität weiterhin gewährleistet werden. Die Gewährleistung der Fitness wird dabei regelmäßig durch Effizienzverluste (Anpassungskosten) 'erkauft'. Wurden die 'richtigen' Strukturen etabliert, so geht es darum die Effizienz des Systems wieder durch komplexitätsreduzierende Stabilisierungsmaßnahmen zu erhöhen (Abb. 10). Das Komplexitätsspektrum, in dem sich ein solches Wechselspiel zwischen Veränderungs- und Stabilitätsorientierung vollzieht, definiert hier also den Anpassungsraum des Managements (Abb. 9). Deutlich wird, daß sich Zielkonflikte zwischen der ökonomischen und ökologischen Managementdimension (der Logistik), immer dann ergeben, wenn es keine Schnittmenge zwischen den Anpassungsbereichen der beiden Dimensionen gibt.

Um nun das Dilemma zwischen der Effizienz auf der einen Seite und der Effektivität auf der anderen Seite möglichst gering ins Gewicht fallen zu lassen bieten sich dem (Logistik-) Management grundsätzlich zwei Ansatzpunkte: Zum einen kann versucht werden, auf die Entwicklung der Umwelt entsprechenden Einfluß auszuüben, um systemrelevante Parameter zu stabilisieren. Im Fall des betrieblichen Umweltmanagements betrifft dies die Einflußnahme sowohl auf das Umweltbewußtsein von Nachfragern (Öko-Pull), zum Beispiel durch Werbung, als auch auf umweltrechtliche Anforderungen (Öko-Push), beispielsweise in Form eines Lobbying (Abb. 9, Pfeil a). Daneben kann aber auch das Outsourcing von (Logistik-) Leistungen ein Beitrag zur Stabilisierung des (Logistik-) Umfeldes leisten, wenn auf diesem Wege der Umfang des für das betrachtete (Logistik) System relevanten Kontextes reduziert wird (Pfeil a und b). Echte Öko-Pioniere werden demgegenüber versucht sein, durch ein entsprechendes Innovationsverhalten dynamisierende Akzente im Umweltschutz zu setzen. Im Zuge eines proaktiven, integrierten Umweltschutzes versuchen sie die Entwicklung des Umweltrechts sowie des Umweltbewußtseins der Öffentlichkeit und der Abnehmer im besonderen voranzutreiben, um auf diesem Wege entsprechende Pioniergewinne zu realisieren (Pfeil c).

Andererseits kann es vielversprechend sein, die Effizienzfunktion von (Logistik-) Strukturen selbst zu beeinflussen und zwar in der Form, daß der Wirkungsgrad in möglichst geringem Ausmaß mit der Flexibilität des (Logistik-) Systems konfligiert. Einschlägige Ansatzpunkte sind hier beispielsweise flexible Fertigungstechnologien, das Kanban, Just-in-Time und Postponement (Pfeil d).

Deutlich wird schließlich, daß das Einwirken auf die Funktionen der ökologischen und ökonomischen Effektivität und Effizienz eines (Logistik-) Systems auch Ansatzpunkte bietet, Konfliktpotentiale zwischen ökonomischen und ökologischen Zielen abzubauen. Geht man im weiteren von gegebenen Funktionen aus, so kommt es darauf an, Verhaltensmuster zu entwickeln, die auf eine Harmonisierung der ökonomie- und ökologieinduzierten Stoßrichtungen der Systemkomplexität erlauben. Hier ist die Wissenschaft gefordert, entsprechende Gestaltungshilfe für das ökologieorientierte (Logistik-) Management zu erarbeiten.

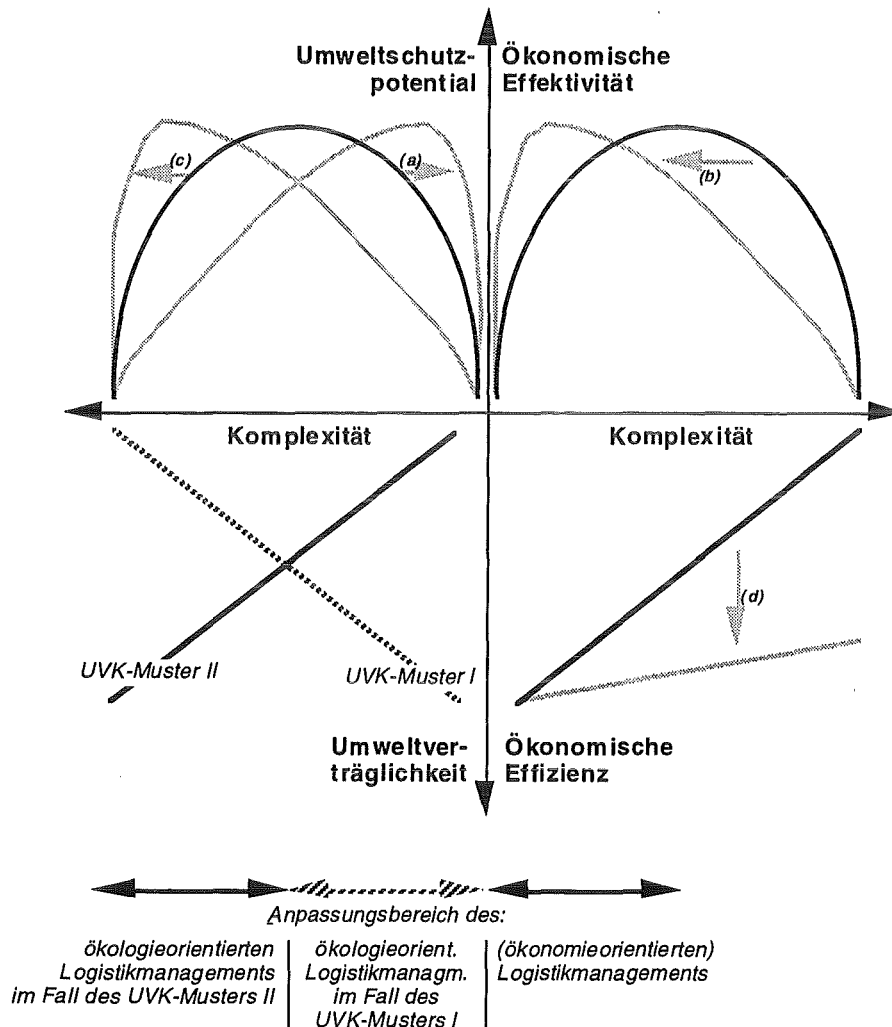


Abb. 9: Grundzusammenhang zwischen Systemkomplexität, effizienz und -effektivität

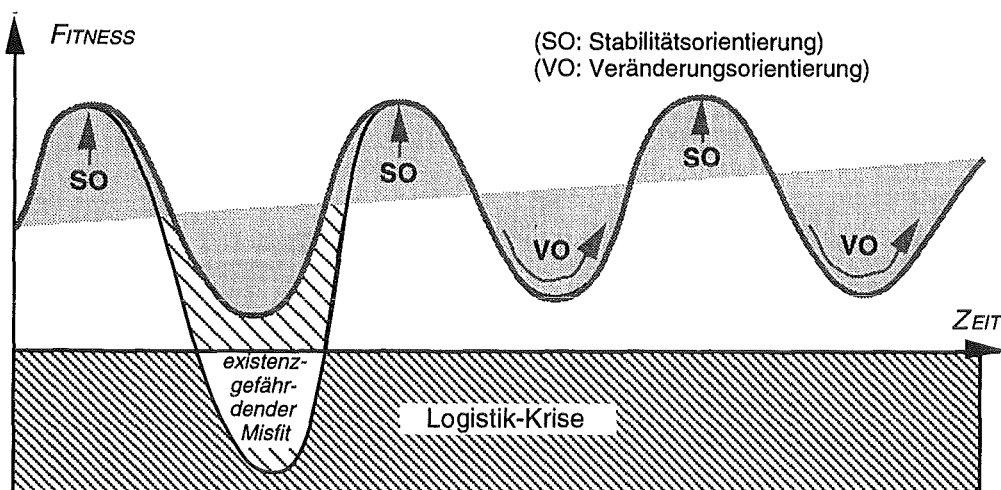


Abb. 10: Fitness eines Logistiksystems im Zeitablauf (Göpfert, Wehberg, 1996)

15 *Konzept eines Modells der
Verkehrsverursachung.*

Brüggemann, U.; Lehmann, H.; Reick, Ch.

Konzept eines Modells der Verkehrsverursachung

Ulrike Brüggemann, Harry Lehmann, Christian Reick

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie

D-42004 Wuppertal

1. Einleitung

Schlägt man in einem Lexikon unter dem Begriff Verkehr nach, so findet man dort zwei Bedeutungsaspekte unterschieden. Verkehr bezeichnet¹

1. alle Arten und Formen sozialer Kontakte und
2. die Raumüberwindung von Personen, Gütern und Nachrichten unter Benutzung besonderer technischer und organisatorischer Einrichtungen (Verkehrsmittel, Verkehrswege und -anlagen).

Ein Stichwort "Verkehrsforschung" findet sich normalerweise nicht. Dennoch kann gesagt werden, daß sich Verkehrsforschung vornehmlich auf die zweite Bedeutung von "Verkehr" bezieht. Und unter "Verkehrspolitik" ist zu lesen: "... Heute erstrecken sich die direkten staatlichen Eingriffe im Verkehrssektor vor allem auf Infrastrukturanlagen des Straßen-, Schifffahrts- und Luftverkehrs, auf das Post- und Fernmeldewesen sowie überwiegend auch auf Eisenbahnen und Betriebe der lokalen Personenbeförderung." Auch hier wieder der alleinige Bezug auf die zweite Bedeutung von "Verkehr".

Dennoch ist wohlbekannt, daß die Notwendigkeit von Verkehr im zweiten Sinne eng mit der ersten, sozialen Bedeutung zusammenhängt: "Die eigentliche wirtschaftliche, gesellschaftliche, kulturelle und politische Bedeutung des Verkehrs ergibt sich aus seiner Mittlerstellung, die ein politisch geordnetes gesellschaftliches Zusammenleben im Raum, den Austausch von Gütern und Kenntnissen, eine regionale Arbeitsteilung und die gegenseitige Befruchtung räumlich entfernter Kulturkreise ermöglicht."² Vor dem Hintergrund dieser weitreichenden Gesellschaft gestaltenden Bedeutung von Verkehr ist die Ausblendung des gesellschaftlich-sozialen Aspektes in Verkehrsforschung und Verkehrspolitik nicht nur unverständlich, sondern geradezu unverantwortlich, denn es steht zu vermuten, daß die allseits zu besichtigenden Ergebnisse des Bündnisses von Verkehrsforschung und -politik, wie Umweltzerstörung, Zerschneidung sozialer Lebensräume, Gefährdung von Leib und

¹ dtv-Brockhaus-Lexikon (dtv, München, 1988)

² "Großes modernes Lexikon", Stichwort "Verkehr", (Bertelsmann, Gütersloh, 1988).

Leben, ein Resultat dieser Ausblendung sind. Bei der Gestaltung des Verkehrs ist offensichtlich die Gestaltung der "Arten und Formen sozialer Kontakte", im Gegensatz zur Gestaltung von z.B. Verkehrsschildern, Kreuzungen und mehrspuriger Autobahnen, nicht im Blick.

Bei Durchsicht der verkehrswissenschaftlichen Literatur wird schnell deutlich, daß konkret wenig bekannt ist über den Zusammenhang zwischen gesellschaftlichen Prozessen und Mobilität.³ Z.B. ging in der Vergangenheit die Zunahme wirtschaftlicher Aktivitäten mit zunehmendem Verkehr einher. Ob aber im Umkehrschluß, wie insbesondere von Industrie und Handel behauptet, ein zunehmender Verkehr die Voraussetzung für eine prosperierende Wirtschaft ist, ist mehr als unzureichend untersucht.⁴ Bezüglich anderer gesellschaftlicher Zusammenhänge sieht es ähnlich aus: Sicherlich gibt es einen Zusammenhang zwischen der zunehmenden Industrialisierung der Nahrungsmittelproduktion und der Verkehrszunahme. Wie aber sieht dieser Zusammenhang konkret aus, was sind die treibenden Kräfte und welche Akteure sind beteiligt? Handelt es sich allein um ein Problem der Nachfrage durch die Konsumenten oder eher um einen inhärenten Prozess einer industrialisierten Gesellschaft? Oder, um ein weiteres Beispiel zu nennen, wie verhalten sich soziale Entwicklungen wie Veränderungen im Geschlechterverhältnis (Titel der Shell Studie 1987: „Frauen bestimmen die weitere Motorisierung“⁵) oder die zunehmende Einkommensspaltung zur Verkehrsentwicklung?

Mit der Bearbeitung und Beantwortung dieser und ähnlicher Fragen wird in dem BMBF-Verbund-Projekt "Ökologisch verträgliche Mobilität in Stadtregionen" Neuland betreten. Im nächsten Abschnitt werden als Ergebnis dieser Arbeit 27 sogenannte Wirkungsketten vorgestellt. Dies sind deterministische Prozesse, die für die Mobilitätsentwicklung relevant sind. Die Vielfalt der Wirkungsketten macht einerseits deutlich, wie speziell herkömmliche Verkehrsmodelle sind, die sich allein auf die Betrachtung der technischen Abwicklung des Verkehrs beschränken. Sie zeigt andererseits, welche enorme Aufweitung des Blickes notwendig ist, um Verkehr im umfassenden Sinne — nämlich Mobilität — zu modellieren.

³Nichts desto Trotz existieren vereinzelte Studien; s. z.B. G.W. Heinze und H.H. Kill, "Evolutionsgerechter Stadtverkehr", Schriftenreihe des VDA, Bd. 66, (Frankfurt, 1991).

⁴Im Gegenteil, es steht sogar zu vermuten, daß z.B. billige Überseetransporte und die damit verbundene Herausbildung eines Weltmarktes, Abhängigkeiten der Wirtschaft hier von Wirtschaften anderswo herstellt, die unkontrollierbar sind, wie z.B. das Problem der Billiglohnländer zeigt.

⁵Deutsche Shell AG (Hrsg.), "Prognosen/Scenarien zur Entwicklung des Pkw-Bestands in Deutschland", (Hamburg, 1987).

Hieraus ergeben sich neue Anforderungen an Verkehrsmodelle. In üblichen Verkehrsmodellen wird die Verkehrsnachfrage zu Beginn der Simulation aus sozio-demographischen Daten abgeleitet, und bleibt dann während der Simulation unverändert. Tatsächlich ist die Verkehrsnachfrage aber nicht unveränderlich, sondern ist, wie die hier vorgestellten Prozesse zeigen, vielfältig mit dem Verkehrsangebot und sozio-ökonomischen Prozessen verkoppelt. Die vorgestellten Wirkungsketten unterscheiden sich erheblich hinsichtlich des Aggregationsniveaus, auf denen sie relevant sind, und auch hinsichtlich ihres Zeithorizontes. Dies erschwert ihre direkte Überführung in ein gemeinsames Modell und erfordert für Verkehrsmodelle ein völlig neues Modellierungskonzept. Ein vielversprechender Ansatz, der es erlaubt die verschiedenen Wirkungsketten von einem einheitlichen Gesichtspunkt aus zu formulieren und dadurch in ein gemeinsames Modell zu überführen, wird in Abschnitt III vorgestellt.

II. Wirkungsketten⁶

Suboptimalität kurzfristiger Lösungen

Durch Wohnraumverknappung und durch Engpässe auf dem Arbeitsmarkt kann bei einem Umzug oder einem Wechsel des Arbeitsplatzes nicht für optimal kurze Wege gesorgt werden. Da Arbeitsplätze und Wohnungen nur selten gewechselt werden, bauen sich komplexe Wegverflechtungen nur sehr langsam ab, selbst wenn sich das Wohnraum- und Arbeitsplatzangebot deutlich verbessert. Den selben Effekt wie die Wohnraumverknappung haben drastische Mietsteigerungen.⁷

Unverträglichkeiten Gewerbe/Wohnen und Verkehr/Wohnen

Wohnen ist in Gebieten mit starker Lärm- und Schadstoffbelastung durch Gewerbe oder (dem damit verbundenen) starkem Verkehr unverträglich. Umzüge führen langfristig zu einer Entmischung von Gewerbe und Wohnen. Insbesondere Umzüge in schwach belastete Gebiete sorgen dort für ein Ansteigen der Verkehrsmenge.⁸

Wachsende Raumannsprüche von Haushalten, Büros und Geschäften

Junge Menschen beanspruchen zunehmend früher eigene Wohnungen und die Anzahl der Haushalte mit drei Generationen nehmen ab. Dies bedeutet pro Einwohner einen erhöhten Wohnraumbedarf. Ähnlich steigen, z.B. durch

⁶Die Sammlung der Wirkungsketten ist im Wesentlichen Ergebnis einer Auswertung des Abschlußberichtes des Projektbereichs "Rahmenbedingungen der Mobilität" des BMBF-Verbundprojektes "Ökologisch verträgliche Mobilität in Stadtregionen", (Wuppertal Institut, Wuppertal, 1996), im Folgenden als "RB" abgekürzt.

⁷s. Jürgen Aring, "Rahmenbedingungen der Mobilitätsentwicklung — Wohnen und Lebensqualität", Vortrag vom 2.11.1994 am Wuppertal Institut)

⁸RB, Teilprojekt "Raumstrukturelle Voraussetzungen — West".

Verbreiterung von Sortimenten, die Flächenansprüche von Einzelhandelsgeschäften und Einkaufszentren. Insgesamt erhöht sich hierdurch der Bedarf an Wohn- und Geschäftsräumen, der, bei nicht genügendem Neubau zu Verknappungen und damit langen Wegen führt.⁹

Hohe Subventionierung von Transportkosten

Die hohe Subventionierung des Kfz-Verkehrs im Vergleich zum Öffentlichen Nahverkehr macht Kfz-Besitz attraktiv und lädt zur Kfz- Nutzung ein.¹⁰

Auslagerung von Tätigkeiten aus Haushalten und Produktionen

Zunehmend werden Tätigkeiten aus Haushalten ausgelagert: Kochen wird industrialisiert (Tiefkühlkost, immer differenziertere Angebote vorverarbeiteter Speisen) und Haushaltstätigkeiten wie etwa Putzen als Dienstleistung durchgeführt. Im industriellen Sektor findet eine ähnliche Entwicklung statt: die Fertigungstiefe wird verringert, systemische Rationalisierungen werden durchgeführt, Just-in-Time Produktionstechniken werden eingeführt. Dies führt in der Regel zu mehr Verkehr, weil ein größerer Bedarf an differenzierten Vorprodukten besteht, die nicht mehr vor Ort hergestellt werden und auch die Auslastung von Fahrzeugen sinkt. Diese Entwicklung geht einher mit einem Zunehmendem Bedarf an logistischen Dienstleistungen. Neue Standorte für Umschlag, Lagerei, Kommissionierung, Disposition mit großem lokalem Verkehrsaufkommen werden notwendig.¹¹

Zunahme des Freizeitverkehrs

Sowohl durch Veränderung der Altersstruktur der Bevölkerung (der relative Anteil älterer Menschen nimmt zu), als auch durch eine insgesamt steigende Erlebnisorientierung unserer Gesellschaft nimmt der Freizeitverkehr insgesamt zu.¹²

Flexibilisierung der Arbeitszeiten

Die zunehmende Flexibilisierung der Arbeitszeiten verändert Tagesverläufe des Verkehrsaufkommens.¹³

Steigende Qualifikationsanforderungen an Arbeitskräfte

Die Produktion immer differenzierterer Güter und die zunehmende Technisierung erfordern immer differenzierter ausgebildete Arbeitskräfte. Dies bedeutet,

⁹RB, Teilprojekt "Ökonomisch-technischer Strukturwandel".

¹⁰s. M.J. Welfens, D. Gerking, M. Hokkeler, H. Stiller, "Schattensubventionen´ im Bereich des PKW-Verkehrs", Wuppertal Paper Nr. 33.

¹¹RB, Teilprojekt "Ökonomisch-technischer Strukturwandel"; Berichte und Papiere aus dem Projektbereich: "Güterverkehr".

¹²RB, Teilprojekt "Entwicklung der Arbeits- und Freizeitmobilität".

¹³RB, Teilprojekt "Arbeits- und Freizeitmobilität", Teil Erwerbsarbeit.

insbesondere bei Arbeitsmarktengpässen, daß aufgrund differenzierterer Berufsausbildungen immer weniger Arbeitsplätze auf einen Arbeitsuchenden kommen und dadurch bei Arbeitsaufnahme immer längere Arbeitswege in Kauf genommen werden.¹⁴

"Neue Regionalität"

Einer der wenigen verkehrsreduzierenden Prozesse ist die Tendenz zur Aufnahme von Geschäftsbeziehungen zu Lieferanten im näheren Umfeld einer Produktion. Dadurch verkürzen sich Transportwege.¹⁵

Konsumtion zunehmend stärker verarbeiteter Nahrungsmittel

Die Konsumtion zunehmend stärker verarbeiteter Nahrungsmittel hat eine Tendenz zum Kauf von immer kleiner proportionierten Nahrungsmittelmengen. Hierdurch nimmt einerseits die Menge an Verpackungsmaterialien zu, die dann zu vermehrtem Entsorgungsverkehr führen, und andererseits nimmt die Differenziertheit der Sortimente in Geschäften zu, so daß mehr Verkehr zur Herstellung und Verteilung der Produkte notwendig ist.¹⁶

Änderungen im Rollenverständnis von Mann und Frau

Mit der Emanzipation von Männern und Frauen geht eine zunehmende Erwerbstätigkeit von Frauen einher, ohne daß die Erwerbstätigkeit von Männern abnimmt. Mit dieser Erwerbstätigkeit von Frauen ist zusätzlicher Verkehr verbunden, sowohl auf Arbeitswegen als auch auf Wegen bei denen Kinder zur aushäusigen Betreuung gebracht werden.¹⁷

Gesellschaftliche Einkommensspaltung

Die zunehmende Spaltung der Einkommen in unserer Gesellschaft führt dazu, daß die verschiedenen Einkommensgruppen sich räumlich entmischen: untere Einkommensklassen sind eher am Stadtrand zu finden und haben daher längere Arbeits- und Versorgungswege zurückzulegen. Höhere Einkommensgruppen können sich sanierte Innenstadtwohnungen leisten (Gentrification) und kommen dadurch mit kürzeren Arbeits- und Versorgungswegen aus.¹⁸

¹⁴RB, Teilprojekt "Arbeits- und Freizeitmobilität", Teil Erwerbsarbeit.

¹⁵RB, Teilprojekt "Ökonomisch-technischer Strukturwandel".

¹⁶BMBF-Verbundprojekt, Arbeitspapiere des Teilprojektes "Konsum und Güterverkehr".

¹⁷RB, Teilprojekt "Entwicklung der Arbeits- und Freizeitmobilität", Teil "Reproduktionsarbeitsmobilität"

¹⁸RB, Teilprojekt "Entwicklung der Arbeits- und Freizeitmobilität", Teil "Reproduktionsarbeitsmobilität".

Verlust des kindgerechten Wohnumfeldes durch Verkehr

Durch zunehmenden Verkehr wird das Wohnumfeld immer weniger kindgerecht, so daß Kinder zunehmend zu Kindergärten, day care, Schule, Freunden und Spielplätzen gebracht werden müssen. Gleichzeitig nimmt das Angebot an Freizeitangeboten für Kinder zu, so daß diese, insbesondere bei verkehrlich stark belastetem Umfeld, diese in Anspruch nehmen und weiter Verkehr erzeugen.¹⁹

Technikspirale

Jede Technik in Haushalt und Fabrikation, die bestimmte Tätigkeiten verkürzt, erlaubt in der verbleibenden Zeit den Einsatz weiterer Technik. Die zunehmende Produktion und Verwendung dieser Technik ist zwar nicht grundsätzlich, aber doch meistens, mit einer Verkehrszunahme verbunden.²⁰

Einseitige Orientierung der Gesellschaft am Automobil

Historisch hat die Identifizierung einer automobilen Gesellschaft mit einer fortschrittlichen, wirtschaftlich prosperierenden Gesellschaft auf allen gesellschaftlichen Ebenen zur einseitigen Förderung des Automobils geführt.²¹

Finanzielle Probleme der Kommunen

Offensichtlich bedeutsam für die konkrete verkehrliche Entwicklung in den Kommunen ist deren Finanzsituation. Z.B. kann die Stadt Halle a.d. Saale den innerstädtischen ÖPNV nur auf Kosten des ÖPNV im Umland instand halten, was zwangsläufig den Kfz-Verkehr im Umland erhöht.²²

Neue Kommunikationstechnologien

Durch die Schaffung von Heimarbeitsplätzen verringert sich das Verkehrsaufkommen. Gleichzeitig eröffnet sich durch die selben Kommunikationstechnologien ein größerer Markt, der mit einer Zunahme an Verkehr einher geht.

Synchronisierungszwänge

Die Zunahme der Zeit, die außer Haus an verschiedenen Orten verbracht wird, führt zu Synchronisierungszwängen in der Organisation von Tagesabläufen. In diesem Zusammenhang werden zunehmend Bringdienste wie etwa der Pizza-Service in Anspruch genommen. Eine ähnliche Entwicklung ist im Wirtschaftsleben zu beobachten: Firmen, die für ihre Arbeit auf die Zulieferung durch andere Firmen

¹⁹RB, Teilprojekt "Entwicklung der Arbeits -und Freizeitmobilität", Teil "Reproduktionsarbeitsmobilität".

²⁰RB, Teilprojekt "Sozial-kulturelle Rahmenbedingungen der städtischen Mobilität".

²¹RB, Teilprojekt "Sozial-kulturelle Rahmenbedingungen der städtischen Mobilität".

²²Aussage eines Kommunalvertreters der Stadt Halle auf einem Treffen des Verbundprojektes am 13/14.10.95.

angewiesen sind, benutzen zum schnelleren Transport von Briefen, Paketen und kleineren Waren zunehmend Bringdienste.²³

Autokauf und Stadtstruktur

Werden Autos gekauft, so werden sie auch genutzt. Damit werden Auto-orientierte Einkaufszentren und Freizeitorte in infrastrukturschwachen Lagen erreichbar und rentabel. Auf Grund dieser starken Konkurrenz werden entsprechende Einrichtungen in städtischen Wohnquartieren unrentabel — die fußläufige Infrastruktur dünnt aus, weitere Autokäufe sind die Folge.

Mit zunehmenden Autokäufen nehmen gleichzeitig Verkehrsbelastungen (Lärm, Luftverschmutzung, Zerschneidung des Stadtraumes) zu. Zu Fuß gehen und Fahrradfahren wird zunehmend gefährlicher. Insgesamt nimmt die Qualität von Wohnorten ab. Dies hat einerseits zur Folge, daß Naherholungsgebiete als "Fluchräume" bedeutsam werden. Andererseits werden Wohnorte in Gegenden am Stadtrand, wo weniger Verkehr ist, verlagert; gleichzeitig sind dort die Verkehrsverbindungen schlechter. Beides macht weitere Autokäufe zur Überwindung der langen Distanzen notwendig.²⁴

Verkehrsinduktion durch Straßenbau

Auf die Überlastung von Straßen wird üblicherweise mit Straßenausbau reagiert. Hierdurch verlagert sich Verkehr von anderen Straßen auf die ausgebaute Straße. Gleichzeitig regt der nun beseitigte kapazitive Engpaß zum Umsteigen vom Umweltverbund auf das Auto an. Und außerdem verbessert sich die Erreichbarkeit von Orten an und im Einzugsbereich der Straße, wodurch bestehende Gelegenheiten besser genutzt werden können und die Ansiedelung weiterer Betriebe, Geschäfte und Anwohner sinnvoll wird. In jedem Fall führt diese Entwicklung zu einer weiteren Verkehrszunahme, die langfristig wieder zur Überlastung der Straße führt.²⁵

Versorgung älterer Menschen und Verkehrszunahme

Insgesamt nimmt die durchschnittliche Haushaltsgröße ab und ältere Menschen leben häufiger alleine. Dadurch findet die Betreuung und Versorgung durch Kinder oder Verwandte nicht mehr innerhalb eines Mehr-Generationen-Haushaltes statt, sondern die älteren Menschen müssen zur Betreuung unter Inkaufnahme eines erhöhten Verkehrsaufwandes aufgesucht werden. Dies wird insbesondere durch die Pflegeversicherung finanziert.²⁶

²³BMBF-Verbundprojekt, Berichte und Papiere aus dem Projektbereich "Güterverkehr".

²⁴nach D. Seifried, "Gute Argumente Verkehr".

²⁵nach D. Seifried, "Gute Argumente Verkehr".

²⁶RB, Teilprojekt "Entwicklung der Arbeits- und Freizeitmobilität", Teil "Reproduktionsarbeitsmobilität"

Wohnraumverknappung und Verkehrszunahme

Mit abnehmenden Haushaltsgrößen nimmt bei gleichzeitig konstanter oder gar wachsender Bevölkerung der Bedarf an Wohnungen zu. Bei gleichzeitigem Mangel an Wohnungen stehen bei einem Arbeitsplatzwechsel oder bei Auszug junger Menschen aus der elterlichen Wohnung im Normalfall keine arbeitsplatznahen Wohnungen zur Verfügung. Dies hat eine Zunahme der mittleren Entfernung zwischen Wohnung und Arbeitsplatz zur Folge, die insgesamt mit einer Verkehrszunahme einhergeht.

Typische Reaktion von Verkehrsbetrieben auf steigende Defizite

Bei steigenden Defiziten, z.B. auf Grund gestiegener Kosten, reagieren Verkehrsbetriebe häufig mit Tarif-Erhöhen, Wegrationalisierung von kundennahen Servicestellen und Fahrplanausdünnungen. Hierdurch wird der öffentliche Personennahverkehr für die Kunden unattraktiver. Die damit sinkenden Fahrgastzahlen führen zu weiteren Defiziten und in der Folge zu schlechten Nahverkehrssystemen.²⁷

Differenzierte Qualitätsproduktion

Mit einer immer differenzierteren Qualitätsproduktion nimmt die Nachfrage nach kleinen Sendungen zu, die Bündelungsfähigkeit der zu transportierenden Waren nimmt damit ab, was für sich genommen bereits mit einem zunehmenden Verkehr einhergeht. Gleichzeitig wird durch diese Entwicklung der Massengüterverkehr (Schiffe und Bahnen) benachteiligt, d.h. zunehmender Transport mittels Lkw. Die Nachfrage nach immer differenzierteren Produkten führt außerdem zu einer Zunahme des Dienstleistungsverkehrs (Handwerker, Kurierdienste).²⁸

Recycling

Mit zunehmenden Abfallmengen erweisen sich verbesserte Recyclingtechniken als sinnvoll. Die Nutzung dieser Techniken geht normalerweise mit der Notwendigkeit stärkerer Sortierung des Abfalls einher (Glas, Plastik, Metall, Kleidung, ...). Diese verschiedenen Materialien sind dann zu separater Verarbeitung getrennt zu transportieren. Im Stadtraum bedeutet dies eine Zunahme des Entsorgungsverkehrs.

²⁷nach D. Seifried, "Gute Argumente Verkehr".

²⁸RB, Teilprojekt "Ökonomisch-technischer Strukturwandel".

Reduzierung der Eigenfertigung

Aus Kostengründen reduzieren viele Betriebe ihre Eigenfertigung. Dies führt zu verstärktem Bezug von Halbfertigprodukten, der mit einem verstärkten Verkehrsaufkommen einhergeht.²⁹

Zunahme von Begleitverkehren

Mit zunehmendem Verkehr wird aufgrund der zunehmenden Unübersichtlichkeit des Verkehrs die selbständige Bewältigung von Wegen für ältere Menschen und Kinder gefährlicher. Dies hat zur Folge, daß die Betroffenen durch Verwandte, Freunde und Bekannte an ihren Zielort begleitet/gebracht werden. Hierdurch entsteht jeweils ein zusätzlicher Rückweg, also noch mehr Verkehr.³⁰

3. Modellierungskonzept für das Mobilitätssystem

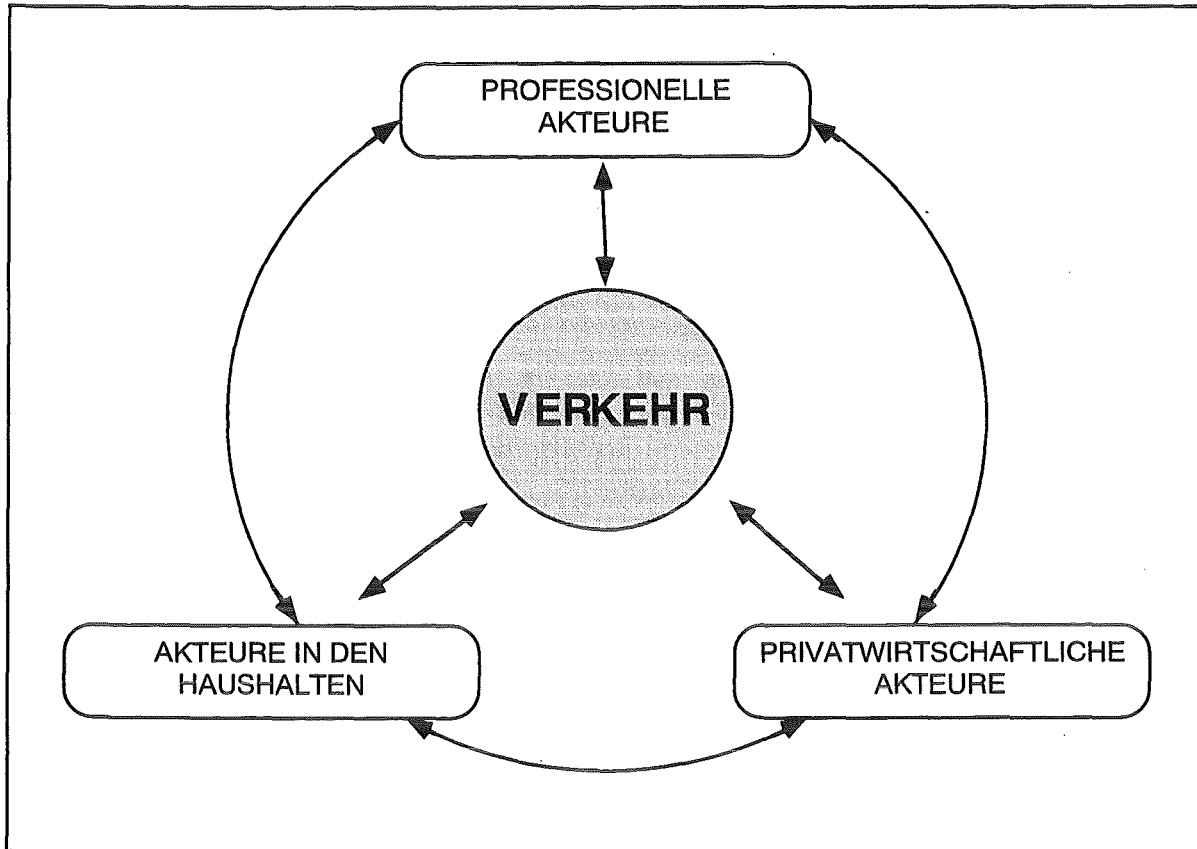
Die im vorigen Abschnitt vorgestellten Wirkungsketten sind hinsichtlich ihrer Thematik und ihres Aggregationsniveaus sehr unterschiedlich, so daß gefragt werden muß, wie dies alles in ein Modell einbezogen werden kann. Eine offensichtliche Gemeinsamkeit der beschriebenen Prozesse ist trivialerweise der Bezug zum Verkehr, so daß ein solches Modell sicher eine Darstellung dieses Verkehrs enthalten muß. Weitere Gemeinsamkeiten sind kaum zu finden.

Auf der Suche nach einem geeigneten Modellierungsansatz haben wir eine Reihe von Systemanalyse-Workshops mit TeilnehmerInnen aus verschiedenen Bevölkerungsgruppen (ArbeitnehmerInnen, SchülerInnen, SeniorInnen) durchgeführt. Ziel der Sitzungen war es, Einblicke in das "System der Mobilität in Stadtregionen" aus Betroffenen-sicht zu gewinnen. Hierbei hat sich gezeigt, daß die Perspektiven auf Mobilitätszusammenhänge für verschiedene Bevölkerungsgruppen deutlich verschieden sind. Betrachtet man Menschen in unterschiedlichen Lebenslagen, so wird das mobilitätsbezogene Handeln erst unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Sichtweisen auf Mobilitätszusammenhänge verständlich.

Hieraus ergibt sich ein allgemeiner Modellierungsansatz. Unsere These ist, daß sich das gesamte Mobilitätssystem — insbesondere also auch jede Wirkungskette — ausgehend von *Akteuren* beschreiben läßt, die auf Basis ihres speziellen Verständnisses der Bewandtniszusammenhänge handeln. Die Dynamik des Mobilitätssystems ergibt sich dabei aus dem komplexen Zusammenspiel der Handlungen vieler Akteure.

²⁹RB, Teilprojekt "Ökonomisch-technischer Strukturwandel".

³⁰RB, Teilprojekt "Entwicklung der Arbeits- und Freizeitmobilität", Teil "Reproduktionsarbeitsmobilität"



Prinzipieller Aufbau des Mobilitätssystems

Grob lassen sich drei Gruppen von Akteuren unterscheiden:

- *Professionelle Akteure*, d.h. die MitarbeiterInnen der Stadtverwaltungen, die politischen FunktionsträgerInnen und die Beauftragten von Interessengruppen (z.B. Einzelhandelsverband).
- *Privatwirtschaftliche Akteure*, wie z.B. UnternehmerInnen, ImmobilienhändlerInnen oder GeschäftsinhaberInnen.
- *Akteure in den Haushalten*, d.h. Familienmitglieder, ArbeitnehmerInnen, ältere Menschen etc.

Alle Akteure stehen in irgendeinem Verhältnis zum Verkehr, teilnehmend, wie Akteure aus den Haushalten oder aber nicht-teilnehmend, wie die professionellen Akteure, die eher mit der Gestaltung des Verkehrs befasst sind. Die Akteure interagieren einerseits direkt über den Verkehr: Inhaber von Lebensmittelgeschäften sind auf verkehrsgünstige Lagen angewiesen, die den Akteuren aus den Haushalten leicht zugänglich sind. Und Verkehrsteilnehmer behindern sich im Verkehr gegenseitig (was z.B. zu Staus führt) und unter anderem die Wahl ihrer Wohnorten beeinflusst. Andererseits interagieren die Akteure aber auch auf andere Weise: z.B. Mieten werden an Hauseigentümer gezahlt, Gewerbesteuer wird abgeführt. Trotz keines

direkten Bezugs auf den Verkehr sind diese Beziehungen durchaus mobilitätsrelevant, wie obige Wirkungsketten zeigen.

Grundsätzlich kann man drei Zeitskalen unterscheiden, auf denen sich das Mobilitätssystem entwickelt. Auf einer *kurzfristigen Zeitskala* werden insbesondere in den Haushalten, aber auch bei Speditionsfirmen, Taxiunternehmen etc., Entscheidungen über die Art der Aktivitäten der Akteure, die Ziele von Wegen, die dazugehörigen Routen und Verkehrsmittel sowie über die Ausführungszeiten gefällt. Dies ist die Zeitskala auf der der eigentliche Verkehr sich abspielt, d.h. es geht um wenige Tage oder auch Wochen. Auf einer *mittelfristigen Zeitskala* (Wochen bis Jahre) finden Änderungen der Infrastruktur statt: neue Geschäfte werden eröffnet oder geschlossen, Autos werden gekauft, Arbeitsplätze gewechselt, Haushalte ziehen um oder es werden verkehrliche Umstrukturierungen vorgenommen, wie etwa die Einführung einer verkehrsberuhigten Zone oder der Ausweisung von Anwohnerparkplätzen. Insgesamt handelt es sich hier um Aktivitäten die die organisatorische Struktur der Stadt verändern. Demgegenüber ändern bauliche Veränderungen die Stadt. im Wesentlichen auf einer *längerfristigen Zeitskala*: neue Brücken werden gebaut oder neue Siedlungsareale erschlossen. Hier geht es um Prozesse die Jahre benötigen.

4. Ausblick

Konkret erarbeiten wir derzeit den Teil des Modells, der die Mobilitäts-Dynamik auf der kurzzeitigen Zeitskala beschreibt. Hier geht es insbesondere um die Akteure aus den Haushalten, die für etwa 80% des Verkehrs (Personenverkehr) verantwortlich sind. Im Gegensatz zu üblichen Verkehrsmodellen wird hier die Rückkopplung zwischen Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot. explizit berücksichtigt. Dies geschieht, indem wir individuelle Lernprozesse der Verkehrsteilnehmer simulieren: Verkehrserfahrungen, wie etwa Abweichungen der erwarteten Ankunft von der tatsächlichen Ankunft oder Schwierigkeiten einen Parkplatz zu finden, gehen in zukünftige Verkehrsentscheidungen ein. Darüber hinaus wird die Einschränkung üblicher Verkehrsmodelle auf außerhäusige Tätigkeiten fallen gelassen; dies ist sinnvoll, da sich in Anbetracht raum-zeitlicher Restriktionen die individuelle Verkehrsnachfrage als Ergebnis einer komplexen Gestaltung raum-zeitlicher Tagesabläufe ergibt. Hier wird auf Gedankengut der auf Hägerstrand³¹ zurückgehenden Aktionsraumanalyse zurückgegriffen. Berücksichtigt werden auch

³¹Torsten Hägerstrand, "What about People in Regional Science?", Regional Science Association Papers, Vol. XXIV (1972), 7-21.

soziale Restriktionen: Die modellierten Verkehrsteilnehmer sind in unserem Modell nicht in einem sozial leeren Raum angesiedelt, sondern soziale Bindungen, die sich etwa in der Notwendigkeit der Betreuung von Kindern oder einem gemeinsamen Mittagessen äußern, werden explizit bei der Modellierung von individuellen Tagesabläufen berücksichtigt.

Das so für die kurzzeitige Zeitskala entwickelte Modell bildet den Ausgangspunkt für spätere Erweiterungen zu einem vollständigeren Modell der Mobilität in städtischen Regionen. Hier werden dann weitere Akteure, die auch auf mittel- und langfristiger Zeitskala agieren, in das Modell eingefügt.



**16 Verkehrs- und Logistikmodellierung unter
Umweltaspekten im Forschungsprojekt MOBILE.**

Hilty, L. M.

Verkehrs- und Logistikmodellierung unter Umweltaspekten im Forschungsprojekt MOBILE¹

Lorenz M. Hilty
Fachbereich Informatik, Universität Hamburg
Vogt-Kölln-Str. 30, D-22527 Hamburg
hilty@informatik.uni-hamburg.de

Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das Projekt MOBILE (Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment). Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Systems zur umweltbezogenen Modellbildung und Simulation im Bereich Verkehr und Logistik. 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 article gives an overview on the project MOBILE (Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment). The goal of this project is to develop a system for environment-oriented simulation modelling in the field of traffic and logistics. 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 Das Projekt wird für 3 Jahre gefördert von der Volkswagen-Stiftung im Rahmen des Förderschwerpunktes „Umwelt als knappes Gut“.

1 Zielsetzung des Projekts MOBILE

Ziel des Projekts MOBILE 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.

2 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. 1). Selbstverständlich kann eine Person beide Benutzerrollen einnehmen und somit über beide Schnittstellen mit dem System interagieren. 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 später 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 2.1 und 2.2 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/Meyer 1996).

Mit dem GIS und dem Daten- und Methodenbanksystem werden im wesentlichen die statischen Aspekte der zu bearbeitenden Aufgaben abgedeckt (linke Hälfte von Abb. 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 anfordern.

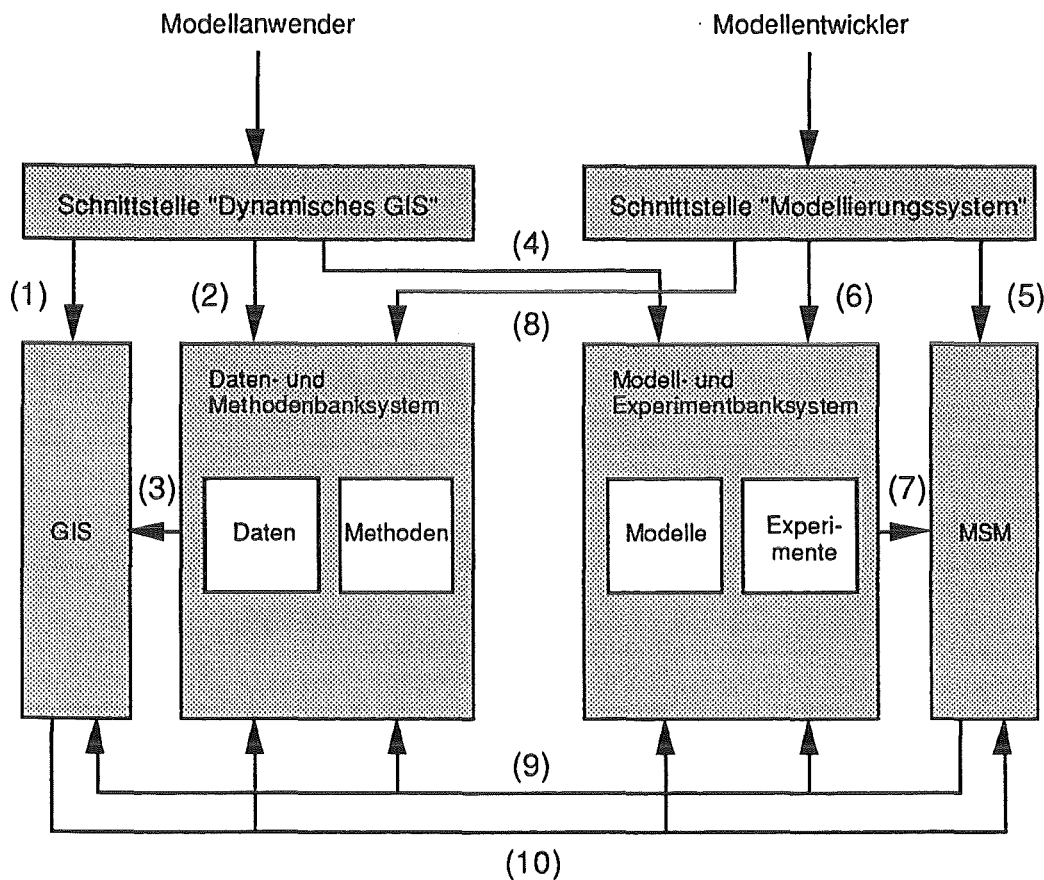


Abb. 1: Architektur des MOBILE-Systems

2.1 Das System aus Sicht des Modellanwenders: ein dynamisches GIS

Geographische Informationssysteme (GIS) sind auf die Verwaltung und Verarbeitung raumbezogener Daten spezialisiert (vgl. Star/Estes 1990, Bill 1996). 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 1).

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 gehören auch Verfahren zur Datenvisualisierung, die für das Anwendungsgebiet spezifisch sind (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 Modelle und die Methoden in einer Klassenhierarchie organisiert. Der Benutzer kann die Modell- und Experimentbank veranlassen, Experimentspezifikationen (MOBILE-Scripts) der MSM zur Ausführung zu übergeben (7).

Diese Art der Modellanwendung kann als Spezialfall unabhängig vom GIS erfolgen. Interessanter sind aber die Fälle, in denen die Experimentspezifikation auf Daten oder Methoden 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.

Wenn bestimmte Modellexperimente zu Routineaufgaben werden, gibt es die Möglichkeit, diese vom GIS aus anzustoßen, wobei alle Details der Ausführung dem GIS-Benutzer vorborgen bleiben (Standardexperimente). Damit wird das GIS zum Client, der eine Experimentspezifikation generiert oder aus der Experimentbank abrufen, 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.

2.2 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.

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 während des Ablaufs von Modellexperimenten findet dagegen, wie in 2.1 bereits beschrieben, über Verbindung (9) statt.

3 Realisierung

Die in Abschnitt 2 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 Kopplung“ (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. Als eine von mehreren Möglichkeiten der Kommunikation zwischen den Systemkomponenten wurde http gewählt und implementiert. Dieses Protokoll bietet den Vorteil, die Systemkomponenten auch über das WWW koppeln zu können.

Bisher wurde ein verbreitetes, einfaches GIS (MapInfo) um Methoden zur Visualisierung verkehrs- und umweltbezogener Daten und um Kommunikationsschnittstellen erweitert. In näherer Zukunft wird zusätzlich auch ArcView 2 integriert werden, um die Flexibilität und Kompatibilität des Systems im GIS-Bereich zu verbessern.

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.²
- 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 als Baustein der Modellbank neu implementiert;
- Emissionsmodell: Berechnet abhängig von Verkehrsstärke, Verkehrsmix und Durchschnittsgeschwindigkeit die Emissionsraten (Schadstoffe 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 (Weihs 1995).

² Mögliche Anwendungen dieses Modells sind z.B. Untersuchungen zu Verkehrseffekten der Flexibilisierung von Arbeits- oder Ladenöffnungszeiten.

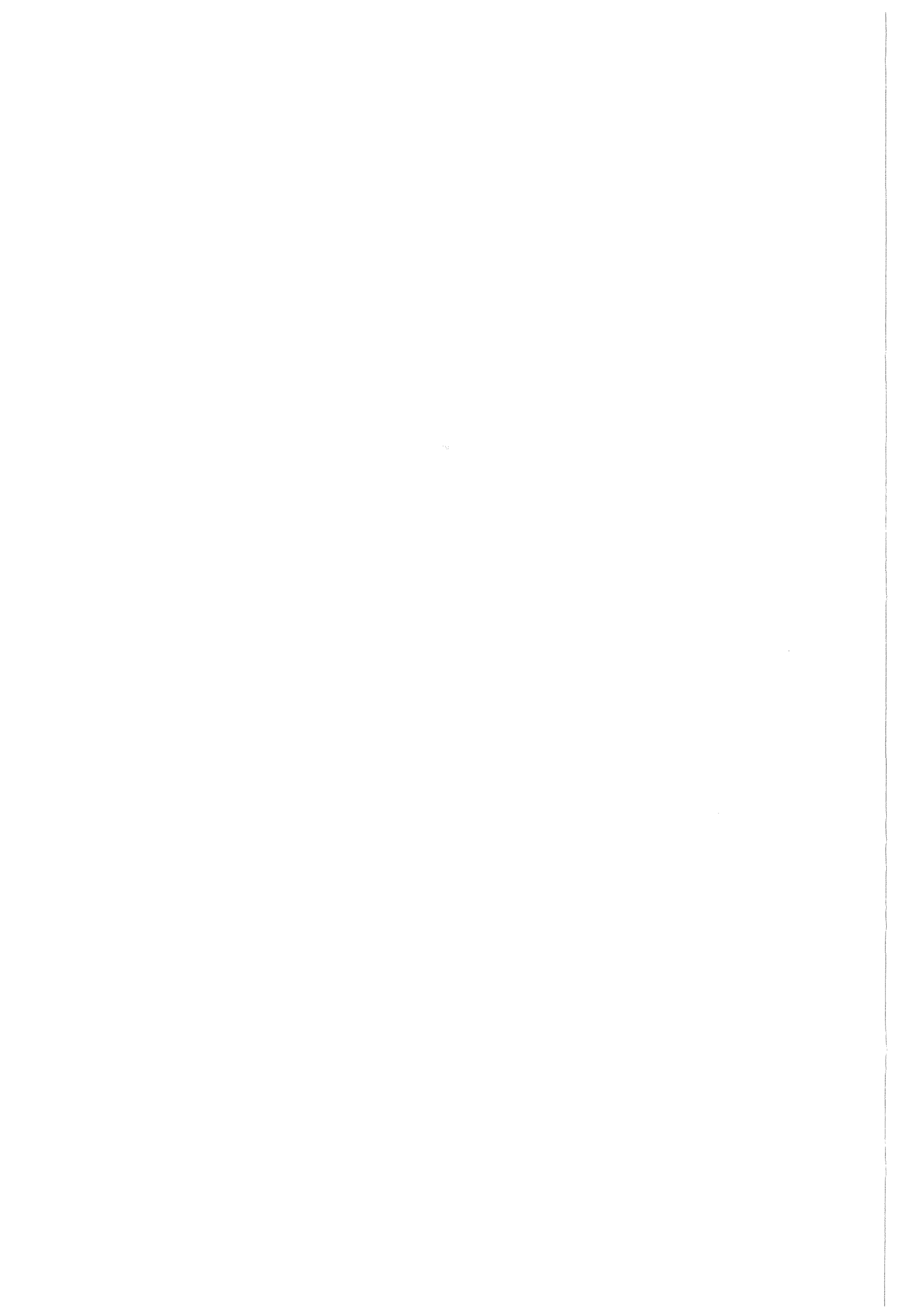
4 MOBILE im WWW

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

5 Literatur

- Bill, R. (1995): Raumbezogene Datenverarbeitung in Umweltinformationssystemen. In: Page/Hilty (1995), S. 125-148
- Bossel, H. (1995): Umweltproblematik und Informationsverarbeitung. In: Page/Hilty (1995), S. 33-42
- Hilty, L. M. (1994): Ökologische Bewertung von Verkehrs- und Logistiksystemen – Ökobilanzen und Computersimulation. Diskussionsbeiträge des IWÖ-HSG Nr. 18, St.Gallen: Institut für Wirtschaft und Ökologie an der Hochschule St.Gallen
- 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
- Lechler, T. (1996): Klassifikation von Verkehrsmodellen. Proceedings des 6. Workshops des GI-Arbeitskreises „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“, 13.-15.3.1996, Magdeburg
- 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. 9th International Symposium on Computer Science for Environmental Protection CSEP '95. Marburg: Metropolis, S.376-384
- Meyer, R.; Hilty, L. M. (1996): Modellvarianten in einer Simulationsstudie über die Auswirkungen einer Umgehungsstraße. Report des Fachbereichs Informatik, Universität Hamburg (in Vorbereitung)
- Mügge, H.; Meyer, R. (1996): Beschreibung von Modellexperimenten in der MOBILE Script Language (MSL). Proceedings des 6. Workshops des GI-Arbeitskreises „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“, 13.-15.3.1996, Magdeburg
- Oehler, M.; Kröger, K.-H. (1995): Mikroskopische Simulation von Autobahnabschnitten am Beispiel des Elbtunnels. Studienarbeit. Fachbereich Informatik der Universität Hamburg
- Page, B.; Hilty, L. M. (Hrsg.) (1995): Umweltinformatik – Informatikmethoden für Umweltschutz und Umweltforschung, 2. Auflage. München, Wien: Oldenbourg
- Star, J.; Estes, J. (1990): Geographic Information Systems – An Introduction. Englewood Cliffs: Prentice Hall
- Weihrauch, L. (1995): Entwicklung eines einfachen Ausbreitungsmodells unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Umsetzungen. Studienarbeit. Fachbereich Informatik der Universität Hamburg



17 Klassifikation von Verkehrsmodellen.

Lechler, T.

Klassifikation von Verkehrsmodellen

Tim Lechler

Fachbereich Informatik, Universität Hamburg

Vogt-Kölln-Str. 30, D-22527 Hamburg

tlechler@informatik.uni-hamburg.de

Abstract

Um einen Überblick über bestehende Modelle aus dem Bereich des Verkehrs und der Logistik zu erhalten, wird ein anwendungsspezifisches Ordnungssystem in Form einer modifizierten Facettenklassifikation erarbeitet. Das auf qualitativen Merkmalen dieser Simulationsmodelle basierende Ordnungssystem bezieht sich im wesentlichen auf inhaltliche Aspekte der Fragestellung und methodische Aspekte der Modellierung der betrachteten Modelle. Eine Implementierung eines einfachen Informationssystems für die hier behandelten Systeme ist in Form von Hypertext-Seiten im WorldWideWeb realisiert.

1. Motivation und Nutzen der Klassifikation

Anlaß zur Erstellung eines systematischen Ordnungssystems für Verkehrsmodelle gab das Forschungsprojekt MOBILE (MModel Base for an Integrative view on Logistics and Environment), das in den Jahren 1995-1997 am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg durchgeführt wird. Ziel des Projekts ist es, eine Modellbank zu erstellen, in der einzelne Modellbausteine aus den verschiedenen Bereichen des Verkehrs zu neuen Simulationsmodellen verknüpft werden können. Daraus entstand der Bedarf der Erfassung und der Ordnung von Simulationsmodellen im Anwendungsgebiet Verkehr und Logistik, um einen systematischen Überblick über die bisher erstellten Modelle und deren eventuelle Verwendbarkeit innerhalb der angestrebten Modellbank zu erhalten.

Aus dieser Motivation heraus entstand das hier vorgestellte Klassifikationsschema für eine einheitliche und systematische Ordnung aller Verkehrsmodelle. Über die Strukturierung dieses Anwendungsgebietes der Simulation hinaus kann dieses Ordnungssystem auch einen Beitrag zur Vereinheitlichung der Begriffswelt liefern, über die in vielen Aspekten der Verkehrssimulation noch kein Konsens herrscht. Weiterhin kann ein solches Ordnungssystem als Grundlage für eine Metadatenbank über Verkehrsmodelle dienen, die mit Schnittstelle zum WorldWideWeb des Internet auch zu einer öffentlich zugänglichen, zentralen Informationsstelle für Verkehrsmodellierer avancieren kann.

2. Ordnungsprinzipien - einfache Klassifikation

Das hier betrachtete Sachgebiet kann nach mehreren Ordnungsprinzipien geordnet werden, aber nicht jedes Ordnungsprinzip ist gleich gut geeignet. Gerade in Hinsicht auf den Zweck einer Ordnung ist die Wahl eines geeigneten Ordnungsprinzips ausschlaggebend. Die einfache Klassifikation als Ordnungsprinzip teilt eine gegebene Menge von Objekten in Untermengen ein (Klassen), die in praxi möglichst homogen sind. Gleiche bzw. ähnliche Objekte bezüglich eines einzelnen betrachteten Merkmals werden in einer Klasse zusammengefasst. Zu unterscheiden sind drei Arten von Klassifikationen:

- *Disjunkte Klassifikation:* Jedes Objekt kann nur genau einer Klasse zugeordnet werden, Mehrfachzuordnungen sind nicht erlaubt. Diese Art der Klassifikation wird verwendet, wenn ein Objekt nur eine Ausprägung bezüglich des betrachteten Merkmals besitzen kann.
- *Überlappende Klassifikation:* Ein Objekt kann im Gegensatz zur disjunkten Klassifikation auch mehreren Klassen zugeordnet sein. Dies ist unumgänglich, wenn ein Objekt mehrere Ausprägungen eines Merkmals besitzt und folglich jeder Klasse zugeordnet werden muß, die eine der zutreffenden Ausprägungen repräsentiert.
- *Hierarchische Klassifikation:* Um eine weitere Detailierung der einzelnen Klassen zu erreichen, können diese wiederum in Unterklassen aufgeteilt werden. Bei dieser weiteren

Klassifikation der bereits erstellten Klassen können wiederum disjunkte, überlappende oder hierarchische Klassenstrukturen gebildet werden.

Wesentlicher Nachteil einer einfachen Klassifikation ist der Bezug auf nur ein Merkmal der zu klassifizierenden Objekte. Im vorliegenden Anwendungsfall der Verkehrsmodelle können diese jedoch aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet und nach mehreren Kriterien klassifiziert werden. Eine einzelne Einfachklassifikation kann diesen verschiedenen Sichtweisen nicht gerecht werden.

3. Ordnungsprinzipien - Facettenklassifikation

Als Erweiterung der einfachen Klassifikation gilt die Facettenklassifikation nach Ranganathan¹. Bei dieser Art der Klassifikation werden mehrere Merkmale berücksichtigt, nach denen eine Objektmenge eingeteilt werden kann. Jedes dieser Merkmale wird durch eine eigenständige Einfachklassifikation repräsentiert, dessen Klassen die Merkmalsausprägungen widerspiegeln.

Die einzelnen Merkmale werden "Facetten" der Klassifikation genannt. Nach Ranganathan's Definition dürfen die einzelnen Klassifikationen aber nur einstufig und disjunkt sein. Diese Einschränkung wurde in Hinblick auf die Anwendung dieses Ordnungsprinzips im Bibliothekswesen gemacht. Werden nur einstufige, disjunkte Klassifikationen für jede Facette gebildet, kann ein Dokument durch eine Auflistung seiner Klassenzuordnungen in einer vorgegebenen Reihenfolge indiziert werden. Dabei wird durch diese Einschränkungen garantiert, daß jedes Dokument nur genau einmal einer Klasse einer Facette zugeordnet wird und der so gebildete Index immer aus einer konstanten Zahl² von Subindizes gebildet werden. Die Vorgabe der Reihenfolge läßt dann auch schon aus dem Index die Zuordnung der Merkmalsausprägungen erkennen.

Diese für die Dokumentationslehre praktische Einschränkung auf disjunkte, einstufige Klassifikationen bringt aber erhebliche Nachteile für die Klassifikation von Verkehrsmodellen mit sich. Um z.B. einen höheren Detaillierungsgrad zu erlangen können ist es nötig, einzelne Klassen durch Unterklassen spezialisieren zu können (*Hierarchische Klassifikation*). Zudem besitzen Verkehrsmodelle gerade bei qualitativen Merkmalen häufig mehrere Ausprägungen, so daß eine Mehrfachzuordnung erforderlich ist (*Überlappende Klassifikation*). Diese zur Strukturierung hilfreichen Arten der Klasifikation können auf eine disjunkte Einfachklassifikation projiziert werden, indem eigenen Klassen für Ausprägungskombinationen oder -detaillierungen geschaffen werden. Dies erhöht jedoch die Anzahl nötiger Klasse je Merkmal und verschleiert zudem die zugrundeliegende Struktur bezüglich der Detaillierung von Merkmalsausprägungen.

¹ Ranganathan, Shiyali R.: The Colon Classification. New Brunswick, NJ: Graduate School of Library Service, 1965

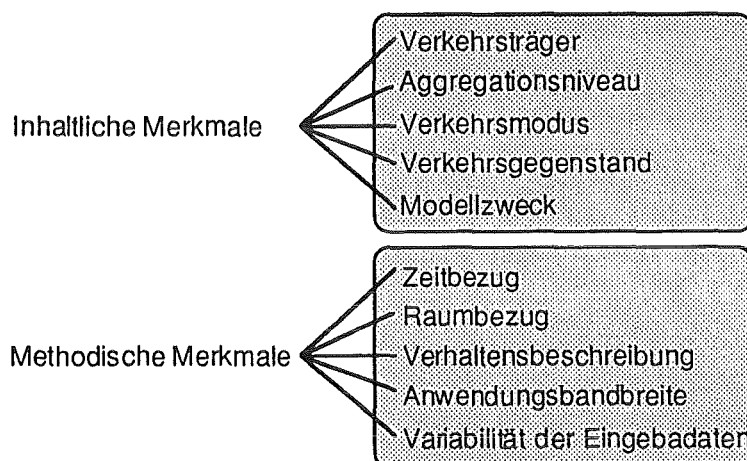
² Entspricht der Anzahl Facetten des Ordnungssystems.

In dem erarbeiteten Ordnungssystem für Verkehrsmodelle sind demnach, im Gegensatz zu Ranganathan's Facettenklassifikation, auch hierarchische und überlappende Klassifikationen möglich. Diese Erweiterung der Facettenklassifikation ist notwendig, um die Ausprägungen einzelner Merkmale der Verkehrsmodelle möglichst klar und übersichtlich strukturieren zu können. Die so modifizierte Facettenklassifikation bildet das Ordnungsprinzip, nach dem diese Klassifikation aufgebaut ist. Das Ordnungsprinzip wird durch die Definition der benötigten Merkmale und deren Klassifikationen zu einem anwendungsspezifischen Ordnungssystem.

4. Wesentliche Merkmale von Verkehrsmodellen

Als Verkehrsmodelle sind hier Simulationsmodelle zu verstehen, die sich inhaltlich mit dem weiten Feld des Verkehrs und der Logistik befassen. Ausgenommen sind hier der leitungsgebundene Verkehr, der Informationsverkehr und der innerhäusige Verkehr. Als Vorgabe aus dem Forschungsprojekt kam hinzu, daß jedes hier betrachtete Modell auch schon auf einer Rechnerplattform implementiert sein muß. Unter diesen Bedingungen wurden 20 Verkehrsmodelle exemplarisch klassifiziert. In Hinblick auf die systematische Ordnung und Übersicht der Verkehrsmodelle werden bei der Klassifikation nur qualitative Merkmale betrachtet, die Aussagen über Inhalt oder Methodik des Modells zulassen.

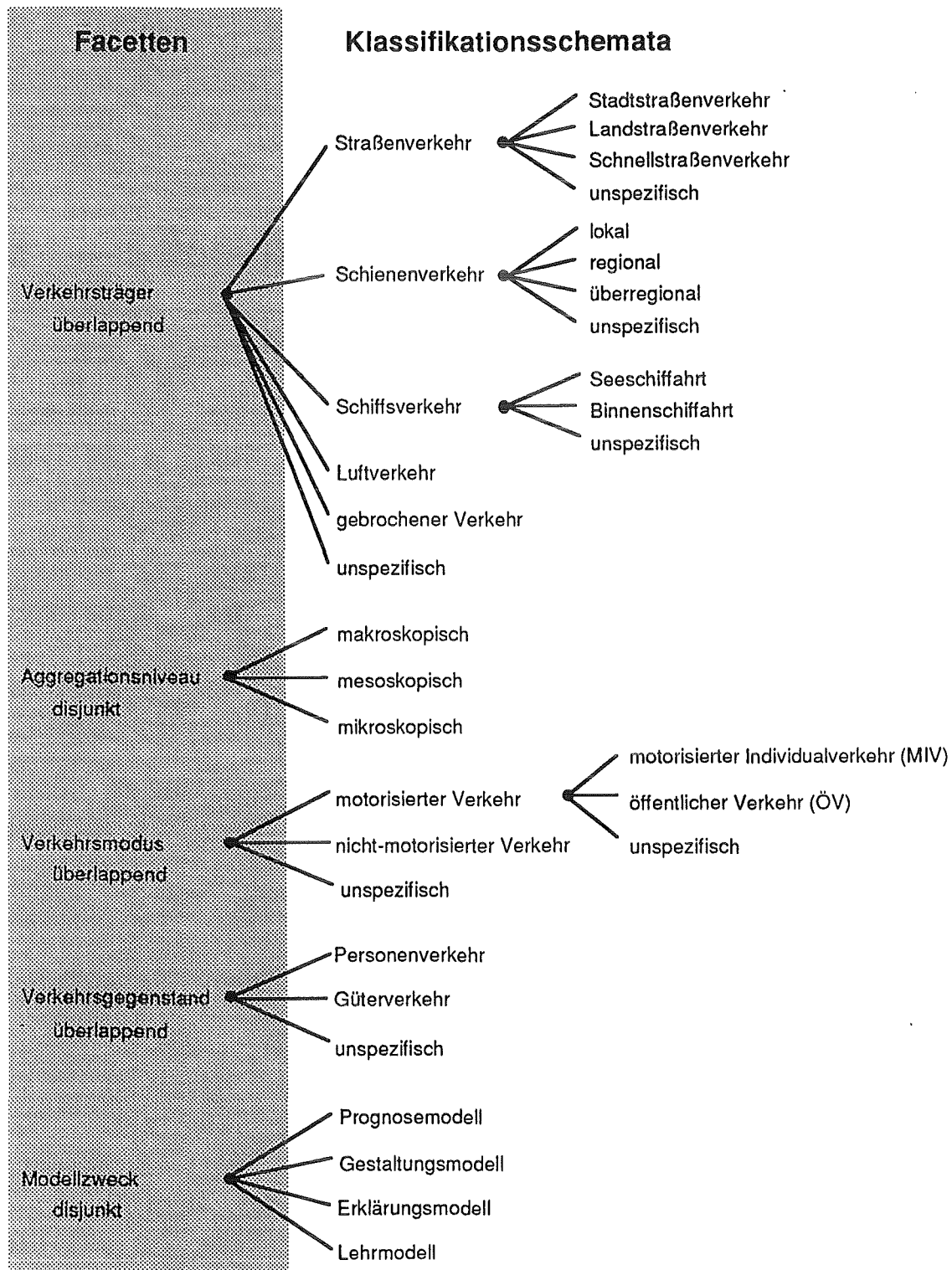
Als wesentlich haben sich bei der Sichtung der Verkehrsmodelle 10 Merkmale herausgestellt. Von diesen beziehen sich fünf primär auf das Anwendungsgebiet des Verkehrs. Die Ausprägungen dieser Merkmale beschreiben weitgehend die Fragestellung, zu deren Beantwortung das jeweilige Modell erstellt wurde. Die anderen fünf beschreiben weniger die inhaltlichen als die methodischen Aspekte der Gestaltung dieser Modelle. Diese Merkmale finden sich in allen Modellen wieder, unabhängig vom Anwendungsgebiet des Verkehrs. In der folgenden Abbildung werden die zwei Gruppen von Merkmalen aufgeführt.



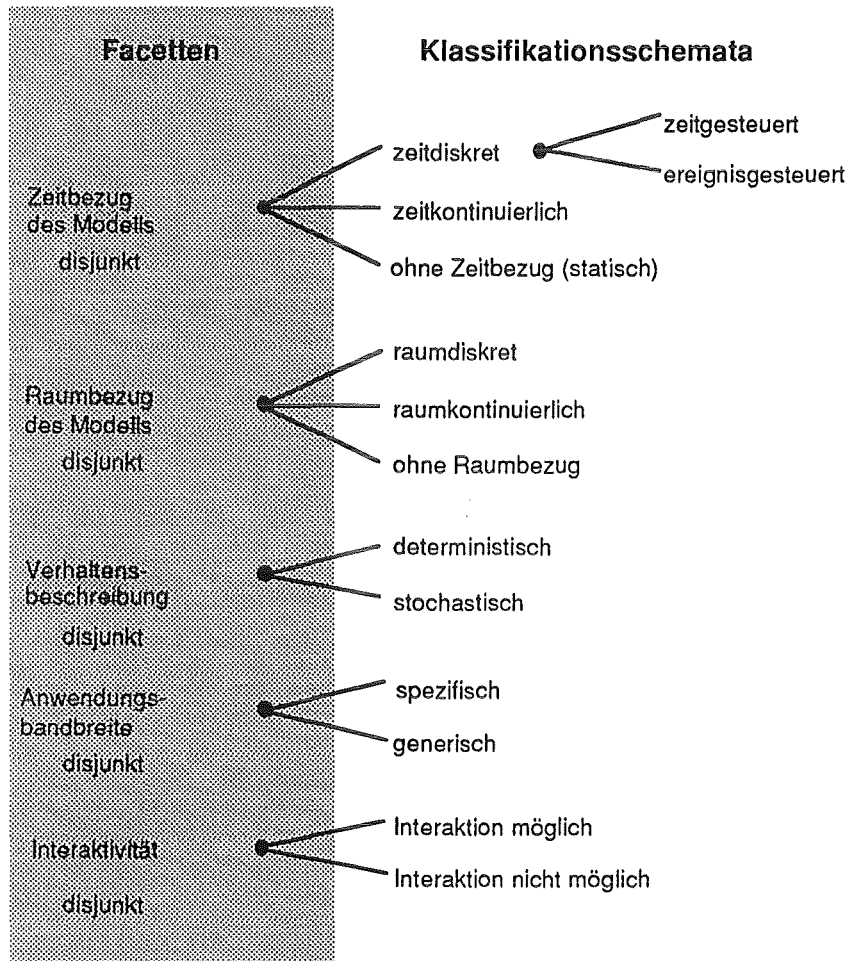
Jedes dieser Merkmale wird bezüglich seiner Ausprägungen klassifiziert. Die Klassen ergeben sich sowohl aus den in der Literatur vorhandenen Ausprägungen der Merkmale, als auch aus Überlegungen zu möglichen Merkmalsausprägungen, die nicht in der gesichteten Literatur aufgetreten waren.

Die resultierenden Klassifikationsschemata können den folgenden Abbildungen entnommen werden. Die Zuordnung der bisher gesichteten 20 Modelle ist nicht in diesen Abbildungen enthalten, kann jedoch über das WorldWideWeb abgefragt werden (siehe die URL am Ende dieses Beitrags).

4.1. Klassifikation der inhaltlichen Merkmale von Verkehrsmodellen



4.2. Klassifikation der methodischen Merkmale von Verkehrsmodellen



5. Kurzbeschreibung der Facetten

Alle aufgeführten Facetten im Detail zu beschreiben, würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen, so daß hier nur einige Besonderheiten angesprochen werden. In den obigen Abbildungen ist jeweils bei den Facetten angegeben, ob diese überlappend oder disjunkt klassifiziert sind. Bei überlappenden Klassifikationen können einzelne Modelle naturgemäß in mehreren Klassen enthalten sein, wenn es bezüglich des betroffenen Merkmals mehrere Ausprägungen besitzt.

- *Verkehrsträger:* Die Klassifikation dieses Merkmals bedarf kaum weiterer Erläuterung. Einen höheren Detaillierungsgrad erhält man durch Bildung weiterer Unterklassen.
- *Aggregationsniveau:* In der Verkehrsmodellierung wird klassisch zwischen makroskopischer und mikroskopischer Modellierung unterschieden. Bei makroskopischem Aggregationsniveau basiert die Nachbildung des Verkehrs auf hochaggregierten Verkehrsgrößen,

wie etwa Durchschnittsgeschwindigkeit, Verkehrsstärke oder -dichte. Einzelne Fahrzeuge können nicht identifiziert werden und sind auch nicht unterscheidbar. Zudem besitzen alle Fahrzeuge gleiche Eigenschaften. Die mikroskopisch orientierte Verkehrssimulation versucht das Verkehrsgeschehen auf Individuenbasis zu simulieren. Die einzelnen Verkehrsteilnehmer können hier identifiziert werden und unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Hier kann auch die gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer untereinander nachgebildet werden. Mit dem Vorteil einer höheren Abbildungsgenauigkeit ist gegenüber der makroskopischen Verkehrsnachbildung allerdings auch der Nachteil des wesentlich höheren Rechenaufwandes verbunden.

- *Verkehrsmodus* : Die Klasseneinteilung ist hier am Modal Split³ orientiert. Auch hier ist eine weitere Spezialisierung durch Unterklassen möglich, um etwa den nicht-motorisierten Verkehr noch in Fußgänger und Radfahrer unterscheiden zu können.
- *Verkehrsgegenstand* : Hier wird nach dem Gegenstand der Transportleistung klassifiziert.
- *Modellzweck*: Der Modellzweck ist zwar nicht ein spezifisches Merkmal von Verkehrsmodellen, muß aber aufgrund seiner inhaltlichen Orientierung unter dieser Gruppe von Merkmalen aufgeführt werden. Als Ausprägungen sind die klassischen vier Zwecke vorgesehen.
- *Zeitbezug*: Klassifikation nach der Behandlung der Simulationszeit.
- *Raumbezug*: Klassifikation nach der Betrachtung des Simulationsraumes. Gerade bei Verkehrsmodellen kommen den räumlichen Dimensionen besondere Bedeutung zu, obwohl auch Verkehrsmodelle ohne Raumbezug existieren.
- *Verhaltensbeschreibung*: Unterscheidung nach dem Einfluß des Zufalls auf die Simulation.
- *Anwendungsbandbreite*: Unter dem Begriff der Anwendungsbandbreite ist die Fähigkeit eines Simulationsmodells zu verstehen, durch Parameter oder Eingabedatenveränderungen auf eine Menge von ähnlichen Systemen anwendbar zu sein. Ist diese Fähigkeit nicht gegeben, wird von einem spezifischen Simulationsmodell gesprochen. Bei generischen Simulationsmodellen ist immer zu beachten, daß diese durch eine Anpassung nicht ihre Validität einbüßen. Im Verkehrsbereich bieten sich generische Modelle besonders bei der Nachbildung mehrerer Streckennetze an.
- *Interaktivität*: Unter Interaktivität eines Simulationsmodells ist dessen Fähigkeit zu verstehen, während der Simulationslaufzeit auf variierende Eingabedaten reagieren zu können.

Die Entwicklung und exemplarische Anwendung dieses Ordnungssystems war Inhalt einer Studienarbeit am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg. Die Ergebnisse sind im WWW veröffentlicht unter http://www.informatik.uni-hamburg.de/ASI/MOBILE_home.html.

³ Der Modal Split beschreibt die Anteile der einzelnen Verkehrsträger am Verkehrsaufkommen



18 Beschreibung von Modellexperimenten in der MOBILE Script Language (MSL)

Mügge, H.; Meyer, R.

Beschreibung von Modellexperimenten in der MOBILE Script Language (MSL)

Holger Mügge, Ruth Meyer
Fachbereich Informatik, Universität Hamburg
Vogt-Kölln-Str. 30, D-22527 Hamburg
{muegge | 1meyer}@informatik.uni-hamburg.de

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts MOBILE¹ wird ein objektorientiertes Modellierungs- und Simulationssystem entwickelt. Einen wesentlichen Bestandteil dieses Systems stellt die MOBILE Script Language (MSL) dar. Sie dient sowohl als Grundlage der Kommunikation zwischen den Systemkomponenten, als auch zur Spezifikation von Modell- und Experimentklassen. Da dieser Beitrag sich auf die Beschreibung von Modellexperimenten konzentriert, wird nur der Teil des Sprachumfangs, der für Modellkompositionen und Experimentspezifikationen erforderlich ist, vorgestellt. Anhand von einigen aufeinander aufbauenden Beispielen werden die textuelle und die graphische Notation von MSL erläutert.

¹ Das Projekt wird für 3 Jahre gefördert von der Volkswagen-Stiftung im Rahmen des Förderschwerpunktes „Umwelt als knappes Gut“.

1 Einleitung

Im Projekt MOBILE (Model Base for an Integrative View of Logistics and Environment) wird ein System zur umweltbezogenen Modellbildung und Simulation im Bereich Verkehr und Logistik entwickelt. Wesentliche Ziele sind dabei die Erweiterung des Modellbestandes, die Verbesserung der Transparenz von Simulationsstudien (Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse) und die Flexibilisierung der Modellnutzung.

Das MOBILE-System ist als offenes, verteiltes System konzipiert und integriert u.a. ein objektorientiertes Modell- und Experimentbanksystem, ein Daten- und Methodenbanksystem, ein Geographisches Informationssystem und eine Simulationssteuerung (vgl. Hilty 1996).

2 MOBILE Script Language (MSL)

Die offene und flexible Systemarchitektur von MOBILE war Ausgangspunkt für die Idee, die MOBILE Script Language (MSL) als Grundlage für die Kommunikation aller Komponenten des verteilten MOBILE-Systems zu definieren. Um eine systemweit möglichst einheitliche Kommunikation zu gewährleisten, gehen die Ausdrucksmöglichkeiten von MSL deutlich über den Bedarf der Beschreibung des systemweiten Kontrollflusses hinaus. Vielmehr deckt MSL auch den gesamten Datenfluß zwischen den Systemkomponenten ab und bietet die Möglichkeit, Modellkompositionen, Experimentspezifikationen sowie Metadaten zu allen MOBILE-Objekten zu beschreiben.

MSL bildet daher auch die Basis der Modell- und Experimentbanksysteme in MOBILE (Mügge/Hilty 1996). Die Verwaltung von Implementierungen in anderen Sprachen (z.B. Simulatoren in C++) kann im wesentlichen auf atomare (d.h. nicht aus Komponenten zusammengesetzte) Modelle beschränkt werden. Zusammengesetzte Modelle werden als Kompositionen in MSL beschrieben². Experimente werden in ähnlicher Weise aus Modellen und anderen Komponenten zu Datenflußsystemen zusammengesetzt und in MSL spezifiziert (siehe Abschnitte 3.2 und 3.3).

² Vgl. dazu Abschnitt 3.1, wo am Beispiel eines Verkehrsumlegungsmodells die Modellkomposition in MSL dargestellt ist.

2.1 Textuelle und graphische Spezifikation in MSL

MSL kommt eine zentrale Bedeutung bei der Schnittstelle für den Modellanwender zu. Aus diesem Grund wird im folgenden nicht nur die textuelle Darstellung von MSL vorgestellt, sondern besonderes Gewicht auf die graphische Notation gelegt. Diese stellt die Grundlage eines geplanten graphischen Editors zur Erstellung von Modellkompositionen sowie Experimentspezifikationen dar. Dieser Editor ist eng mit den Modell- und Experimentbanksystemen verknüpft. In Mügge/Hilty (1996) ist die funktionelle Einbettung der graphischen und textuellen Editoren in das Gesamtsystem näher erläutert.

Im folgenden Abschnitt wird die graphische Notation zu MSL vorgestellt. An dieser Stelle werden nur die Elemente von MSL eingeführt, die zur Darstellung von Modellkompositionen und Experimentspezifikationen nötig sind. Die textuelle Version von MSL kann hier nicht ausführlich erläutert werden. Sie wird daher erst im Anschluß an die Einführung der graphischen Notation und ausschließlich in Form von Beispielen skizziert.

2.2 Graphische Notation von MSL

Sowohl die MOBILE-Modellbank als auch die Experimentbank basieren auf einer objekt-orientierten Klassenhierarchie. Daher werden Modelle, Transformationen³ und Experimente stets als Objekte (Instanzen), die aus der zugehörigen Klasse instantiiert werden, aufgefaßt.

Zur Spezifikation von Modellkompositionen sind neben Objekten (Teilmodellen) auch zwei Arten von Kommunikationsverbindungen erforderlich, um den Datenfluß zwischen den Teilmodellen zu beschreiben. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der datenfluß-basierten Kommunikation, der aktives Senden von Daten zugrundeliegt, sowie der in Objektsystemen verbreiteten, oft als Client-Server-Kommunikation bezeichneten Sichtweise, bei welcher der Server die Daten erst auf Anfrage an den Client sendet. Im Kontext von MOBILE sprechen wir aber in beiden genannten Fällen von Client-Server-Kommunikation, da auch die datenfluß-basierte Kommunikation durch die Technik des Message Passing realisiert wird. Zur Unterscheidung wird im folgenden daher von aktiver und passiver Kommunikation bzw. aktivem und passivem Datenfluß gesprochen.

Während innerhalb von zusammengesetzten Modellen – nicht zuletzt bedingt durch die zugrundeliegende objektorientierte Simulation in MOBILE – häufig die passive Kommunikation vorherrscht, erscheint es bei der Spezifikation von Experimenten oft natürlicher, die Kommunikation zwischen den Komponenten als aktiven Datenfluß zu modellieren.

³ Unter Transformationen werden in MOBILE alle I/O-Systeme verstanden, die nicht als Simulationsmodelle angesehen werden, wie z. B. Analyse- und Statistikmethoden, Datenfilter oder Visualisierungsverfahren. Transformationen werden in der MOBILE-Methodenbank vorgehalten, die weitgehend analog zu den Modell- und Experimentbanken aufgebaut ist.

Bezeichnung	Symbol	Beschreibung
Klasse		konkrete Modell-, Transformations- oder Experimentklasse
Instanz		Modell, Transformation oder Experiment Eingänge: Instantiierungsdaten und/oder Datenfluß Ausgänge: Datenfluß
Datenquelle		keine Eingänge Ausgänge: Datenfluß
Datensenke		Eingänge: Datenfluß keine Ausgänge
Datenfluß von Client zu Server		aktives Senden von Daten (als Client können Quellen und Instanzen, als Server Instanzen und Senken auftreten)
Datenfluß von Server zu Client		(passives) Senden von Daten auf Anfrage (als Client können Instanzen und Senken, als Server Quellen und Instanzen auftreten)
Datenobjekt		wird bei der Instantiierung als Parameter des Konstruktors benutzt
Instantiierung		wird in Experimentspezifikationen verwendet; zur Instantiierung können beliebig viele (auch null) Datenobjekte als Parameter benutzt werden

Abb. 1 : Übersicht über die Elemente der graphischen Notation zu MSL

Zur Beschreibung von Experimenten, die in der Regel die Ausführung von Modellen beinhalten, werden zusätzlich graphische Elemente zur Darstellung von Datenquellen und -senken⁴

⁴ Unter Datensenken sind insbesondere Reportgeneratoren zu verstehen. Daher wird in der textuellen Variante von MSL für Datensenken das Schlüsselwort `reports` benutzt.

benötigt. Dabei deutet die einseitige Abrundung die gerichtete Kommunikationsfähigkeit an – analog zu den beidseitig abgerundeten Instanzen, die sowohl Ein- als auch Ausgaben besitzen können.

Zur Darstellung der Instantiierung selbst werden außerdem Datenobjekte benötigt, die als Parameter von Konstruktoren dienen und so die Objekteigenschaften im Rahmen der Klassendefinition festlegen. Der Datenfluß, der zur Realisierung von Instantiierungen nötig ist, wird durch gestrichelte Pfeile dargestellt, um hervorzuheben, daß er nur einmal stattfindet, bevor der eigentliche Datenfluß zur Laufzeit eines Experimentes beginnt.

3 Anwendungsbeispiel Finkenwerder

In diesem Abschnitt möchten wir MSL anhand einiger Beispiele näher erläutern. Die hier verwendeten Modelle und Experimente wurden im Rahmen einer Fallstudie praktisch erprobt.

Untersuchungsgegenstand dieser Fallstudie ist die Verkehrssituation in Finkenwerder, einem Ortsteil Hamburgs südlich der Elbe mit (immer noch) eher ländlichem Charakter. Das Gebiet besitzt ein hohes Verkehrsaufkommen durch den dort ansässigen Flugzeugbaubetrieb DASA mit ca. 7000 Beschäftigten und den von Pendlern von und nach Hamburg verursachten Durchgangsverkehr. Deshalb ist eine Umgehungsstraße geplant, die den Ortskern entlasten soll. Um die verkehrs- und umweltbezogenen Auswirkungen einer solchen Maßnahme zu simulieren, haben wir u.a. ein Umlegungs- und ein Emissionsmodell in unterschiedlichen Varianten miteinander verknüpft.⁵

Im folgenden beschreiben wir zunächst eine Modellkomposition anhand des in der Fallstudie eingesetzten Verkehrsumlegungsmodells. Daran anschließend gehen wir auf die Experiment-spezifikation mit MSL ein.

3.1 Komposition eines Umlegungsmodells mit MSL

Ein Umlegungsmodell berechnet die Verteilung einer vorgegebenen Verkehrslast auf das jeweilige Straßennetz. Das in der Fallstudie verwendete Modell benötigt als Eingaben Topologie und Attribute des Straßennetzes und die gerichtete Verkehrsnachfrage, d.h. die Anzahl der Fahrten zwischen allen Quellen und Zielen des Untersuchungsgebietes. Diese Fahrten werden dann solange auf die für die einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen jeweils besten Routen „umgelegt“, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, in dem kein Verkehrsteilnehmer mehr seine Situation

⁵ Für eine ausführliche Dokumentation dieser Fallstudie siehe Meyer/Hilty (1996).

durch Wahl einer anderen Route verbessern könnte (Nutzergleichgewicht). Als Ergebnis der Umlegung werden die Verkehrsstärken auf den einzelnen Strecken und die zugehörigen mittleren Geschwindigkeiten ausgegeben.

Das Modell besteht aus den drei Komponenten Kapazitätsmodell, Routenwahlmodell und Umlegungsalgorithmus (siehe Abb. 2).

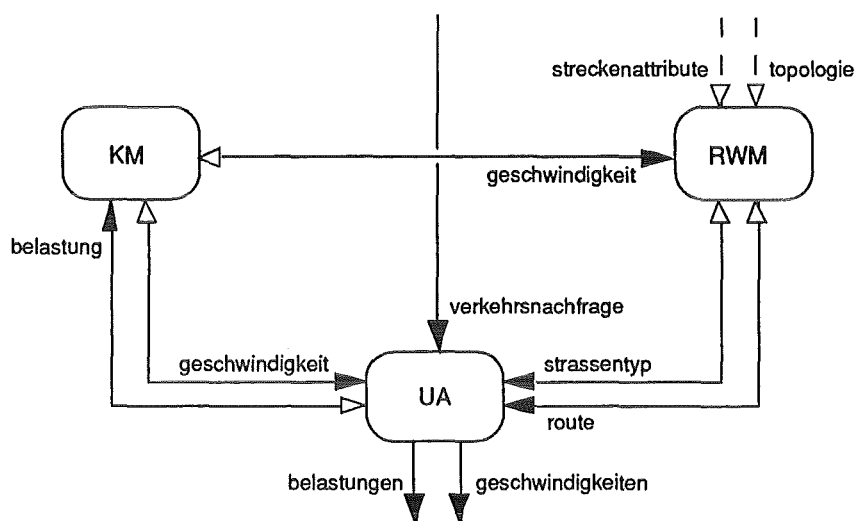


Abb. 2: Graphische Komposition des Umlegungsmodells

- Das Kapazitätsmodell (KM) berechnet anhand von Straßentyp, Höchstgeschwindigkeit und aktueller Verkehrsstärke die mittlere Geschwindigkeit auf einer Strecke gemäß den Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS-W).
- Das Routenwahlmodell (RWM) benötigt die Geschwindigkeit, um den sogenannten Verkehrswiderstand einer Route, der hier durch die Fahrtzeit abgebildet wird, zu ermitteln. Mit Hilfe dieses Wertes wird dann die optimale Route für eine gegebene Quell-Ziel-Beziehung bestimmt.
- Der Umlegungsalgorithmus (UA) berechnet für jeden Zeitpunkt der gerichteten Verkehrsnachfrage die Belastung des Straßennetzes auf der Grundlage der vom Routenwahlmodell ermittelten Routen.

Nachfolgend wird die Komposition des Umlegungsmodells in MSL definiert. Dies geschieht in Form einer Modellklasse *Verkehrsumlegung*, die durch alle nötigen Informationen zur Instanziierung angereichert ist, um die gewünschte Modellinstanz eindeutig zu beschreiben. So können zwei Anforderungen des MOBILE-System-Kontextes erfüllt werden: Zum einen kann die neu definierte Modellklasse – eingebettet in die objektorientierte Klassenhierarchie des MOBILE-Modellbanksystems – in einer Weise verwaltet werden, die eine spätere Wiederverwendung erleichtert, zum anderen wird das benötigte Modell als ausführbares Objekt

verfügbar und kann im Rahmen eines Modellexperimentes zur Durchführung von Simulationen benutzt werden.

```

model class Verkehrsumlegung :
  (topologie, streckenattribute, verkehrsnachfrage) ->
  (belastungen, geschwindigkeiten);

parameter
  topologie : ext (Strecken) -> ext ((Punkt, Punkt));
  streckenattribute : ext (Strecken) ->
    ext ( ( laenge          : Streckenlaenge,
           strassentyp      : RAS_W_Typ,
           maxGeschw       : Geschwindigkeit ) );

input
  verkehrsnachfrage : ext ( (V_Knoten,V_Knoten) ) -> ext (Fahrten);

output
  belastungen      : ext (Strecken) -> ext (Verkehrsstaerke);
  geschwindigkeiten : ext (Strecken) -> ext (Geschwindigkeit);

contains
  models
    KM (Kapazitaetsmodell) :
      (verkehrstaerke) -> (geschwindigkeit);
    RWM (Routenwahlmodell) :
      (geschwindigkeit) -> (strassentyp, route);
      { topologie := this.topologie,
        streckenattribute := this.topologie};
    UA (Umlegungsalgorithmus) :
      (verkehrsnachfrage, strassentyp, route, geschwindigkeit) ->
      (verkehrsstaeerke, belastungen, geschwindigkeiten);

connects
  verkehrsnachfrage to UA;
  KM.geschwindigkeit to RWM,
  to UA;
  RWM.strassentyp to UA;
  RWM.route to UA;
  UA.verkehrsstaeerke to KM;
  UA.geschwindigkeiten to geschwindigkeiten;
  UA.belastungen to belastungen;

end.

```


3.2 Spezifikation eines Experiments in MSL

Ein einfaches Modellexperiment besteht aus der Durchführung eines Simulationslaufs mit einem Modell und der anschließenden Auswertung der Simulationsergebnisse mit Hilfe einer entsprechenden Transformationsmethode. Die Erweiterung dieses elementaren Versuchsaufbaus um ein zweites Modell bildet die Grundlage für die Untersuchung eines Szenarios im Rahmen der Fallstudie. Das dazugehörige Experiment wird im folgenden als „Basis-Experiment“ bezeichnet.

Mit dem Basis-Experiment können die Verteilung der Verkehrsbelastung auf das Straßennetz und die verkehrsbedingte Emission von Luftschadstoffen simuliert werden. Dazu wird das in 3.1 beschriebene Umlegungsmodell mit einem Emissionsmodell gekoppelt. Das Umlegungsmodell berechnet für ein gegebenes Verkehrsnetz und eine gerichtete Verkehrsnachfrage die Verkehrsstärken und mittleren Geschwindigkeiten auf den einzelnen Strecken des Netzes. Diese Daten werden an das Emissionsmodell weitergegeben, das in Abhängigkeit von den nach Fahrzeugart und Fahrmodus differenzierten Emissionsfaktoren die Emissionsraten für jeden Schadstoff – wiederum bezogen auf die Streckenabschnitte – ermittelt. Die von beiden Modellen berechneten Daten werden jeweils mit Hilfe eines Visualisierungsverfahrens in thematische Karten transformiert und dargestellt.

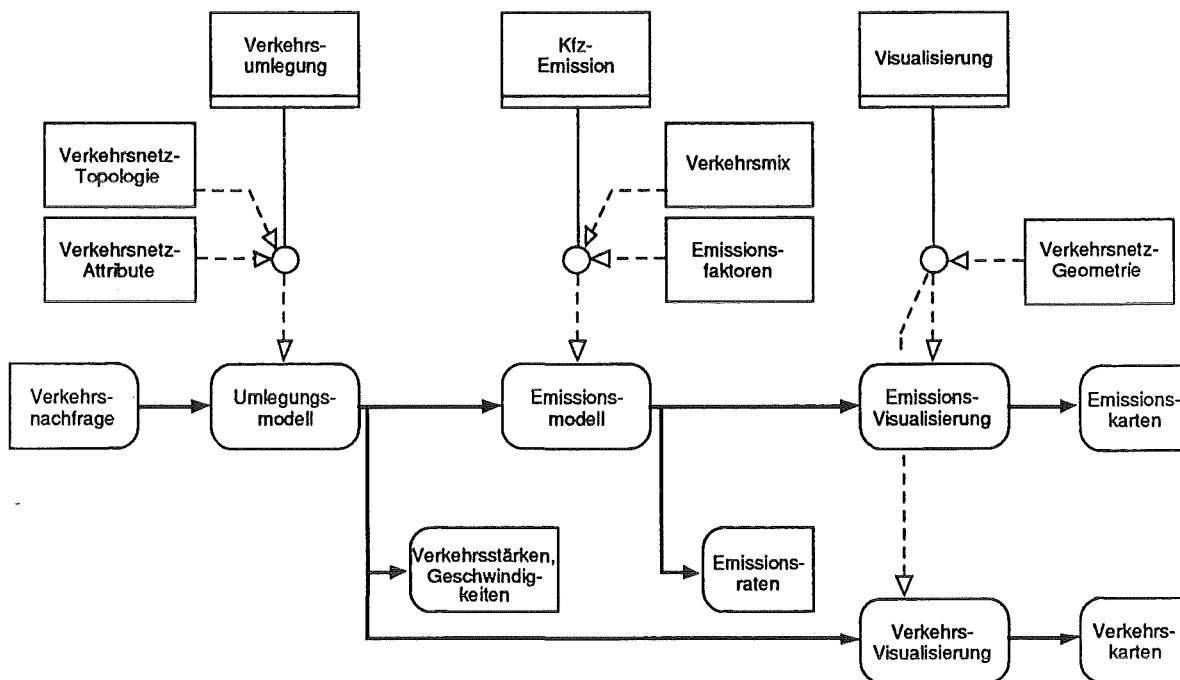


Abb. 3: Graphische Spezifikation des Basis-Experiments

Zu der in Abbildung 3 gezeigten graphischen Notation des Basis-Experimentes wird im folgenden eine textuelle Spezifikation in MSL angegeben. Analog zu der Spezifikation einer

Modellklasse (vgl. Abschnitt 3.1) wird in MSL auch ein Experiment als Instantiierung einer zugehörigen Klasse definiert. D.h. es wird eine Experimentklasse spezifiziert, in der als Defaultwerte für die Instantiierung alle notwendigen Informationen angegeben werden, so daß die Default-Instantiierung (d.h. der Aufruf des Standard-Konstruktors ohne weitere Parameter) gerade das betreffende Experiment als Objekt erzeugt.

Eine MSL-Experimentklasse gliedert sich im wesentlichen in zwei Spezifikationsteile: einen `contains`-Block, in dem die Komponenten des Experimentes beschrieben werden, und anschließend einen `connects`-Block, der die Topologie des Datenflusses zwischen den Komponenten beschreibt.

Im Gegensatz zur Modellspezifikation unterscheidet der `contains`-Block bei der Spezifikation einer Experimentklasse verschiedene Arten von Komponenten⁶. So werden nacheinander Datenquellen, Modelle, Transformationsmethoden, Subexperimente und Datensenzen beschrieben. Dabei wird neben der zugehörigen Klasse dieser Objekte (mit Ausnahme der Datensenzen, deren Eigenschaften durch das vorausgehende Datenflußobjekt determiniert sind⁷) auch deren Signatur⁸ und Instantiierungsparameter angegeben.

```

experiment class BelastungStraßenverkehr

contains
sources
    Verkehrsnachfrage (ZeitreiheÄquidistant): () -> (daten)
    { data      := VerkehrsnachfrageFinkenwerder,
      deltaT    := 1 [h]};
models
    Umlegungsmodell (Verkehrsumlegung) :
    (verkehrsnachfrage) -> (belastungen, geschwindigkeiten)
    { topologie := Finkenwerder.Strassennetz.topologie,
      streckenattribute := Finkenwerder.Strassennetz.attribute };
    Emissionsmodell (KFZ_Emission) :
    (verkehrsstaerken, geschwindigkeiten) -> (emissionsraten)
    { verkehrsmix := Finkenwerder.verkehrsmix,
      emissionsfaktoren := Finkenwerder.emissionsfaktoren };
transformations
    Emissionsvisualisierung (Visualisierung) :
    (raten) -> (karte)
    { geometrie := Finkenwerder.Strassennetz.geometrie };
    Verkehrsvisualisierung (Visualisierung) :
    (verkehrsstaerken, geschwindigkeiten) -> (karte)

```

⁶ Diese Unterscheidung dient sowohl der besseren Lesbarkeit der Spezifikation als auch der effizienteren Verarbeitung von MSL-Skripts, da so die Lokalisierung der Komponente in der entsprechenden Datenbank (z.B. Modellbank, Sachdatenbank oder Experimentbank) vereinfacht wird.

⁷ Auf diese Weise kann die Spezifikation von Datensenzen auf die Angabe eines Namens beschränkt werden.

⁸ Unter der Signatur eines Datenflußobjektes wird hier seine Schnittstelle (Parameter, Eingaben und Ausgaben) verstanden, so wie sie von außen sichtbar ist.

```
    { geometrie := Finkenwerder.Strassennetz.geometrie };  
reports  
    Umlegungsergebnisse;  
    Emissionsraten;  
    Emissionskarten;  
    Verkehrskarten;  
  
connects  
    Verkehrsnachfrage.daten  
        to Umlegungsmodell.verkehrsnachfrage;  
    Umlegungsmodell.belastungen  
        to Emissionsmodell.verkehrsstaerken,  
        to Verkehrsvisualisierung.verkehrsstaerken,  
        to Umlegungsergebnisse;  
    Umlegungsmodell.geschwindigkeiten  
        to Emissionsmodell,  
        to Verkehrsvisualisierung,  
        to Umlegungsergebnisse;  
    Emissionsmodell.emissionsraten  
        to Emissionsvisualisierung.raten,  
        to Emissionsraten;  
    Emissionsvisualisierung.karte  
        to Emissionskarten;  
    Verkehrsvisualisierung.karte  
        to Verkehrskarten;  
  
end.
```

3.3 Höhere Experimente

In Modellexperimenten können nicht nur Modelle, Transformationen und Datenquellen bzw. -senken miteinander verknüpft werden, sondern zusätzlich auch bereits spezifizierte Experimente. Auf diese Weise ist es möglich, höhere Experimente durchzuführen, z.B. um verschiedene Szenarien oder konkurrierende Modelle miteinander zu vergleichen.

Im Rahmen der Fallstudie wurden u.a. zwei verschiedene Szenarien miteinander verglichen, um die Auswirkungen der Umgehungsstraße auf die Verkehrssituation in Finkenwerder zu überprüfen. Dafür konnte das im vorherigen Abschnitt definierte Basis-Experiment „Belastung durch Straßenverkehr“ wiederverwendet werden (vgl. Abb. 3). Da sich die Szenarien nur im zugrundeliegenden Verkehrsnetz unterscheiden (mit oder ohne Umgehungsstraße), müssen nur jeweils Geometrie, Topologie und Attribute des Netzes als Eingabedaten bereitgestellt werden. Für alle anderen Größen können die Default-Werte verwendet werden.

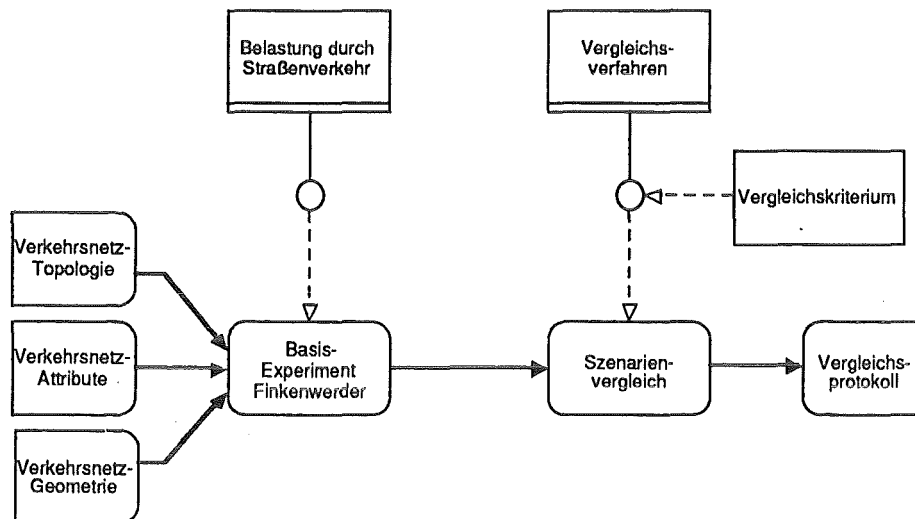


Abb. 4: Graphische Spezifikation eines höheren Experiments

Für jedes Szenario, also jede Ausprägung des Verkehrsnetzes, wird das Basis-Experiment einmal instantiiert und ausgeführt. Die Ergebnisse werden an die Transformation „Szenarienvergleich“ weitergeleitet, die sie entsprechend verarbeitet und ein Vergleichsprotokoll erstellt (s. Abb. 4).

Die textuelle Version des *Szenarienvergleichsexperimentes* stellt insbesondere die Struktur der Datenquellen und deren Zusammenhang mit den Datenobjekten, die im Basis-Experiment zur Instantiierung der Modelle und Transformationen verwendet werden, explizit dar. So ist z.B. die Quelle *VNetzTopologie* als eine *Zeitreihe* definiert, die nacheinander zwei Datenobjekte emittiert. Zuerst wird die Topologie des bestehenden Straßennetzes in Finkenwerder (*Finkenwerder.Strassennetz.topologie*) an das Basis-Experiment übergeben und dort als Instantiierungsdatum (Parameterwert) des Umlegungsmodells eingesetzt. Im zweiten Schritt wird dann die Topologie des Straßennetzes mit eingeplanter Umgehungsstraße an das innere Experiment gesandt. Somit werden also die beiden Szenarien („Status quo“ und „Umgehungsstraße“) nacheinander als Teilerperimente ausgeführt und anschließend verglichen.

```

experiment class Szenarienvergleichsexperiment

  contains
    sources
      VNetzTopologie (SequenzNummeriert): () -> (daten)
        { Data := (Finkenwerder.Strassennetz.topologie,
                    Finkenwerder.Umgebung.Strassennetz.topologie) };
      VNetzAttribute (SequenzNummeriert): () -> (daten)
        { Data := (Finkenwerder.Strassennetz.attribute,
                    Finkenwerder.Umgebung.Strassennetz.attribute) };
      VNetzGeometrie (SequenzNummeriert): () -> (daten)
        { Data := (Finkenwerder.Strassennetz.geometrie,

```

```

                                Finkenwerder.Umgehung.Strassennetz.geometrie) };
transformations
  Szenarienvergleich (Vergleichsverfahren) :
    (verkehrsstaerken, emissionen) -> (ergebnis)
    { vergleichskriterium := MAXIMUM };
experiments
  Basisexperiment (BelastungStrassenverkehr) :
    (netzTopologie, netzAttribute, netzGeometrie) ->
      (verkehrsNetzBelastung, verkehrsNetzEmission)
    { Umlegungsmodell.topologie := netzTopologie,
      Umlegungsmodell.attribute := netzAttribute,
      Verkehrsvisualisierung.geometrie := netzGeometrie,
      Emissionsvisualisierung.geometrie := netzGeometrie };

reports
  Vergleichsprotokoll;

connects
  VNetzTopologie.daten to
    Basisexperiment.netzTopologie;
  VNetzAttribute.daten to
    Basisexperiment.netzAttribute;
  VNetzGeometrie.daten to
    Basisexperiment.netzGeometrie;
  Basisexperiment.vNetzBelastung to
    Szenarienvergleich.verkehrsstaerken;
  Basisexperiment.vNetzEmission to
    Szenarienvergleich.emissionen;
  Szenarienvergleich.ergebnis to
    Vergleichsprotokoll;

end.
```

Zur Erläuterung sei hier noch erwähnt, daß alle in den textuellen MSL-Beispielen verwendeten Namen für Typen und Klassen innerhalb des MOBILE-Systems bekannt sind, indem sie in anderen MSL-Dateien definiert werden. Aufgrund ihrer Gültigkeitsbereiche können sie hier verwendet werden. Entsprechendes gilt ebenso für die benutzten Submodelle (vgl. Abschnitt 3.1), deren Implementierung teilweise in Pascal (unter MacOS) und teilweise in C (unter UNIX) erfolgt ist. Die Schnittstellenbeschreibung dieser atomaren Submodelle liegt zusammen mit einer Definition der zugehörigen Metadaten ebenfalls in Form von MSL-Dokumenten vor.

4 Ausblick

Während die Definition von MSL zur Spezifikation von Modellkompositionen und Experimenten in der ersten Version bereits fertiggestellt ist, ist in nächster Zukunft die Festlegung der Syntax und Semantik von MSL für die anderen Aufgabenbereiche vorgesehen. Dabei wird zunächst die Beschreibbarkeit von Metadaten – zu Modellen, Experimenten und anderen Objekten – im Vordergrund stehen (vgl. Hilty/Mügge 1996a).

Im nächsten Schritt wird dann die Implementierung verschiedener Tools zur Erzeugung bzw. Verarbeitung von MSL-Skripten durchgeführt. Diese Tools sind als feste Bestandteile der unterschiedlichen MOBILE-Systemkomponenten vorgesehen. Um redundante Funktionalitäten zu vermeiden, ist der Gesamtsprachumfang von MSL in die Teilbereiche Modellkomposition, Experimente, Metadaten und Kontrollnachrichten gegliedert.

5 Literatur

- Hilty, L.M. (1996): Verkehrs- und Logistikmodellierung unter Umweltaspekten im Forschungsprojekt MOBILE. Proceedings des 6. Workshops des GI-Arbeitskreises „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“, 13.-15.3.1996, Magdeburg
- Meyer, R.; Hilty, L. M. (1996): Modellvarianten in einer Simulationsstudie über die Auswirkungen einer Umgehungsstraße. Report des Fachbereichs Informatik, Universität Hamburg (in Vorbereitung)
- Mügge, H. (1996): Objektorientierte Spezifikation von Modellen und Experimenten mit MSL. Proceedings zum Treffen des ASIM-Arbeitskreises „Simulationssoft- und -hardware“, 27.-28.2.1996, Ulm
- Mügge, H.; Hilty, L. M. (1996a): Metadata in Model Base Systems. International Seminar UFIS (GSF), March 20 - 22, 1996
- Mügge, H.; Hilty, L. M. (1996b): Ein Modellbanksystem zur objektorientierten Modellierung im Anwendungsgebiet Verkehr und Umwelt. Report des Fachbereichs Informatik, Universität Hamburg (in Vorbereitung)

19 Teilnehmerliste

Teilnehmerliste

Name	Anschrift
J. Alex	ifak Institut für Automation und Kommunikation e. V. Magdeburg Steinfeldstr. 39179 Barleben
J. Benz	Universität Gesamthochschule Kassel, FB 11 Nordbahnhofstr. 1a 37213 Witzenhausen
Th. Bousonville	Universität Osnabrück Institut für Umweltsystemforschung Artilleriestr.34 49069 Osnabrück
M. Clemens	Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg/Vorpommern Bodebucker Weg 3 18276 Güstrow-Gülzow
G. Caduff	Betriebswissenschaftliches Institut der ETH-Zürich Zürichbergstr. 18 CH-8028 Zürich
R. Conrad	TU Braunschweig Institut für Geoökologie Langer Kamp 13c 38106 Braunschweig
T. Christophel	Universität Rostock Fachbereich Informatik Inst. f. Prakt. Informatik, Lehrstuhl Modellierung/Simulation 18051 Rostock
H. Deecke	TU Hamburg-Harburg Woellmerstr. 1 21075 Hamburg
R. Funke	Fraunhofer IITB/EBO Kurstr. 33 10117 Berlin
J. Geldermann	Universität Karlsruhe (TH)-DFIU Hertzstr. 16 76187 Karlsruhe
W. Gräber	Technische Universität Dresden Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften Institut für Grundwasserwirtschaft 01062 Dresden
N. Grebe	Universität Passau, FORWISS 94030 Passau
R. Grützner	Universität Rostock FB Informatik Institut für Praktische Informatik, Lehrstuhl Modellierung/Simulation 18051 Rostock
Dr. L. M. Hilty	Universität Hamburg FB Informatik Vogt-Kölln-Str. 30 22527 Hamburg

6. Treffen des AK „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“

R. Hoch	Universität GH Kassel, FB 11 Nordbahnhofstr. 1a 37213 Witzenhausen
R. Hohmann	Technische Universität Magdeburg Institut für Simulation und Graphik PSF 4120 39106 Magdeburg
G. Jancke	Institut für ökologische Wirtschafts- forschung GmbH (IOW) Giesebrechtstr. 13 10629 Berlin
H.B. Keller	Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Angew. Informatik PSF 3640 76021 Karlsruhe
S. Kraus	Universität Augsburg-Lehrstuhl für Produktion und Logistik Universitätstr. 16 86135 Augsburg
K.-H. Krause	Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Biosystemtechnik, Bundesallee 50 38116 Braunschweig
J. Lechler	Universität Hamburg Fachbereich Informatik Vogt-Kölln-Str. 30 22527 Hamburg
G. Lutze	ZALF Institut für Landschaftsmodellierung Eberswalder Str. 84 15374 Müncheberg
F. Martini	Universität Rostock Fachbereich Informatik Institut für Prakt. Informatik, Lehrstuhl Modellierung/Simulation 18059 Rostock
R. Meyer	Universität Hamburg FB Informatik Vogt-Kölln-Str. 30 22527 Hamburg
H. Mügge	Universität Hamburg FB Informatik Vogt-Kölln-Str. 30 22527 Hamburg
M. Müller	Universität Bremen FB3-Informatik - AG KI PSF 330440 28334 Bremen
Pfleiderer	Universität Stuttgart
M. Poll	Universität Hamburg
St. Pühl	TU Dresden
Ch. Ranze	Universität Bremen FB 3 - Informatik AG KI PSF 330440 28334 Bremen

6. Treffen des AK „Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen“

Ch. Reick	Wuppertal-Institut Systemanalyse und Simulation PSF 100480 42004 Wuppertal
Ch. Rudolf	Siemens-Nixdorf
J. Schanze	Dr.-Pfähler-Str. 7 94469 Deggendorf
W. Scheuerer	Universität Stuttgart Institut für Landschaftsplanung und Ökologie
M. Schmidt	Institut für Energie- und Umweltforschung Wilkenstr. 3 69120 Heidelberg
C. Schulze	Herderstr. 48 49080 Osnabrück
G. Siestrup	Universität Bremen, FB 7 PSF 330440 28334 Bremen
M. Sonnenschein	Universität Oldenburg Fachbereich Informatik Escherweg 2, 26121 Oldenburg
G. Wehberg	Philipps - Universität Marburg Fachbereich Wirtschaftswissenschaften Am Plan 2 35032 Marburg
R. Wieland	ZALF Institut für Landschaftsmodellierung Eberswalder Str. 84 15374 Müncheberg
J. Wittmann	Universität Rostock Fachbereich Informatik Inst. für Prakt. Informatik, Lehrstuhl Modellierung/Simulation 18051 Rostock

20 Informationen über den AK

Der Arbeitskreis "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen" ist ein Arbeitskreis der Fachgruppe 4.6.1 "Informatik im Umweltschutz" der Gesellschaft für Informatik.

20.1 *Problemstellung*

Die Modellierung und Simulation ist eine der wichtigsten Problemlösungsmethoden im Umweltbereich, um Vorhersagen und Abschätzungen des Verhaltens von Umweltsystemen durchzuführen. Das gilt insbesondere bei der Bestimmung der anthropogenen Einwirkungen auf die Umwelt. Dazu sind heute modernste Methoden und Werkzeuge erforderlich, um den komplexen Umweltsystemen bei den wachsenden Umwelthanforderungen gerecht zu werden.

Eine der wesentlichen Aufgaben der Informatik ist es, hierfür geeignete Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, sie einem breiten Anwendungsbereich verfügbar zu machen und die Kenntnisse zu Nutzung zu vermitteln.

20.2 *Historie, Ziel und Themen des AK*

Der AK wurde im März 1992 gegründet. Es hat sich zum Ziel gesetzt, die Erarbeitung der fachlichen Grundlagen der Modellbildung und Simulation im Umweltbereich sowie der zugehörigen Methoden und Softwarewerkzeuge zu fördern. Der AK bildet eine Basis für den Informationsaustausch der in diesem Bereich Tätigen. Insbesondere wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Informatikern, Anwendern und Fachexperten aus einschlägigen Bereichen gefördert. Der Arbeitskreis arbeitet mit der "Arbeitsgemeinschaft Simulation" ASIM eng zusammen.

Schwerpunktthemen sind :

- Systeme und Werkzeuge zur Modellbildung und Simulation / Schnittstellen
- Simulations- und Experimentiermethoden
- Modellbildung im Umweltbereich
- Anwendungen und Integration
- Simulation und Umweltinformationssysteme

20.3 Aktivitäten

Der Arbeitskreis veranstaltet Workshops und Treffen der Mitglieder und Interessierten zum Themenkreis des AK. Bisher wurden folgende Workshops durchgeführt :

1. Workshop "Modellierung und Simulation im Umweltbereich", 25. - 26.6.1992, Universität Rostock
2. Workshop "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen", 5. - 6.11.1992, FH Karlsruhe
3. Workshop : 28. - 29.10.1993, GH Kassel, Teil Witzenhausen
4. Workshop : 23. - 24.6.1994, Martin-Luther-Universität Halle
5. Workshop : 2. - 3.3.1995, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode
6. Workshop : 13. - 15.3.1996, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

20.4 Leiter / Ansprechpartner

Prof. Dr. habil. Rolf Grützner
Universität Rostock, FB Informatik
Lehrstuhl Modellierung und Simulation von Informatiksystemen

Albert-Einstein-Str.21
D-18051 Rostock

Tel.: (0381) 498-3369
Fax.: (0381) 498-3426
e-mail: gruet@informatik.uni-rostock.de



21 Publikationen des AK

1. Grützner,R.; Möller,A.; Pawletta,Th. (Hrsg.): Beiträge zum Workshop Modellierung und Simulation im Umweltbereich. 25. - 26.6.1992 in der Universität Rostock, FB Informatik, 1992
2. Keller,H.B.; Grützner,R. (Hrsg.): Treffen des AK "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5159, März 1993
3. Keller,H.B.; Grützner,R.; Benz,J. (Hrsg.): Treffen des AK "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5310, April 1994
4. Keller,H.B.; Grützner,R.; Angelus, R. (Hrsg.): Treffen des AK "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5552, April 1995
5. Keller,H.B.; Grützner,R.; Paul, W. (Hrsg.): Treffen des AK "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 5622, September 1995