GESELLSCHAFT FÜR REGIONALFORSCHUNG

Deutschsprachige Gruppe der Regional Science Association

SEMINARBERICHTE

8 Freckenhorst bei Münster/Westf., Oktober 1972

		Seite:
THOSS:	Methodischer Ansatz eines integrierten Optimierungsmodells zur Verbesserung des Umweltschutzes	3
BRASSE, THOSS, KÖHNECKE:	Ein aktivitätsanalytisches Umweltmodell zur Flächennutzungsplanung	15
BRASSE:	Optimierung der Müllbelastung	29
WIIK:	Ein multiregionales Entscheidungsmodell zur Optimierung der Abwasserbelastung	53
DÖLLEKES:	Die Optimierung der Abgasbelastung in der Bundesrepublik Deutschland	89
KESSEL:	Sozialökonomische Determinanten der Verkehrsmittelwahl	109
SCHMIDT:	Zur modellmäßigen Erfassung des interregionalen Güterverkehrs	123

Veröffentlicht: Januar 1974 Schriftleitung: P. Brasse

G E S E L L S C H A F T F Ü R R E G I O N A L F O R S C H U N G

Deutschsprachige Gruppe der Regional Science Association

S E M I N A R B E R I C H T 8

Referate, gehalten auf dem Herbstseminar
2. - 5. Oktober 1972, Freckenhorst (bei
Münster i.W.)

Herausgeber: Gesellschaft für Regionalforschung, Heidelberg

Geschäftsstelle: Dr. Günter Strassert, 66 Saarbrücken,
Scheidter Str. 138

Copyright: Das Copyright liegt jeweils beim Verfasser

Redaktion dieses Berichts:
P. Brasse, Institut für Siedlungs- und Wohnungswesen
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster,
44 Münster, Stadtgraben 9
F.: 0251/490 2970.

Rainer Thoss

Ziel, Ansatz und Methoden eines integrierten Optimierungsmodells zur Verbesserung des Umweltschutzes

1 Gesamtmodell

Nach Ziel und methodischem Ansatz weist das Umweltmodell eine große Ähnlichkeit mit der vom Club of Rome initiierten MIT-Studie "The Limits to Growth"[1] auf. Bekanntlich wird in jener Untersuchung mit Hilfe eines mathematischen Modells festzustellen versucht, wie weit Bevölkerung und Wirtschaft unter status-quo-Bedingungen voraussichtlich wachsen können, und wann es unter alternativen Annahmen wegen der Begrenztheit der ökologischen Ressourcen auf der Erde zum Zusammenbruch des Wirtschaftskreislaufs kommt. Auch in dem hier erläuterten Projekt wird ein solches Modell zur Erprobung der Belastbarkeit der Umwelt konstruiert. Anders als bei Meadows wird aber die Belastbarkeit der Umwelt direkt in das Modell eingeführt und die Grenze der wirtschaftlichen Nutzung der betrachteten Regionen bestimmt.

Das von Meadows gewählte Verfahren leidet unter dem Mangel, daß zunächst die Entwicklung des Systems unter status-quo-Bedingungen in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt wird und daß erst danach durch Alternativrechnungen Hinweise auf eine Strategie zur Abwehr der vorausgesagten Entwicklung gewonnen werden können, die nur zufällig mit der besten erreichbaren Lösung übereinstimmen und die darüber hinaus im Vergleich zu den Ergebnissen der status-quo-Prognose erfahrungsgemäß nur wenig Beachtung finden. Zunächst sind denn auch viele Autoren durch die Ergebnisse der genannten Untersuchung zu resignierenden und kulturpessimistischen Betrachtungen veranlaßt worden. Andere haben versucht, mit dem Hinweis auf die drohende Umweltkatastrophe ihre Forderung nach Überwindung des kapitalistischen Systems zu untermauern.

Im Gegensatz zu dem von den Autoren der MIT-Studie eingeschlagenen Weg, die Konsequenzen alternativen Maßnahmen für die Umwelt zu untersuchen, bestimmen wir diejenigen Maßnahmen, die zur Einhaltung bestimmter Umweltstandards erforderlich sind.

---

1) D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers und W.W. Behrens III, The Limits to Growth, A Report on the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, New York 1972.

Diese Aufgabe bedingt die Beschäftigung mit vielfältigen Eingriffen in den Prozeß der wirtschaftlichen Entwicklung, die im wesentlichen - aber nicht nur - in den Bereich der Infrastrukturplanung und der Regionalplanung fallen. Die Suche nach dem besten Weg zur umweltunschädlichen Gestaltung des Wachstumsprozesses durch planmäßigen Einsatz von Maßnahmen sowohl im öffentlichen, als auch im privaten Bereich ist Gegenstand unserer Untersuchung.

Unter der Grenze des Wachstums einer Region verstehen wir nämlich nicht denjenigen Zustand oder Zeitpunkt, an dem die Einwohner dieser Region in ihren eigenen Abfällen umkommen oder an dem sie aus Rohstoffmangel nicht mehr produzieren können, sondern wir verstehen darunter jenes Niveau der wirtschaftlichen Aktivität, das zu einem Zeitpunkt - unter Ausschöpfung aller planerischen und organisatorischen Maßnahmen - möglich ist, ohne die natürlichen Lebensgrundlagen in der Region zu beeinträchtigen.

Man findet diese Grenze für jede beliebige Region und jeden beliebigen Zeitpunkt durch Lösung der Optimierungsaufgabe:

> Maximiere einen Indikator der wirtschaftlichen Aktivität unter der Nebenbedingung, daß die Umwelt dennoch sauber bleiben soll!

Die Einhaltung bestimmter Umweltnormen wird nach dieser Formulierung als ein Hauptziel der Regionalpolitik betrachtet; wirtschaftliches Wachstum nur als Nebenziel. Im Sinne der normativen Umweltforschung bleibt dabei vorläufig ungeklärt, ob die Einstufung des Wachstums als Nebenziel gerechtfertigt ist.

Für den untersuchten Zeitraum und die untersuchte Region soll die Lösung der gestellten Optimierungsaufgabe eine Entscheidungshilfe für die Beantwortung der Fragen liefern, welche Mischung der Wirtschaftsbranchen in der Region anzustreben ist, an welcher Stelle der Ausstoß von Schadstoffen vorrangig zu drosseln ist, welche Prozesse der Abfallbeseitigung optimal sind und in welchen Bereichen eine wirtschaftliche Arbeitsteilung mit Nachbarregionen anzustreben ist.

Voraussetzung für die Berechnung der zur Beantwortung dieser Fragen notwendigen Ergebnisse ist, daß es gelingt, die Beziehungen zu erfassen, die zwischen der Höhe der Produktion der einzelnen Sektoren und den von diesen Sektoren bei unterschiedlichem Stand der Technik verursachten Umweltbelastungen bestehen. Man benötigt hierfür ein Gleichungssystem aus getesteten empirischen Hypothesen und Definitionsgleichungen, das den Zusammenhang zwischen Umweltbelastung und wirtschaftlicher Nutzungsintensität numerisch beschreibt.

Der zeitliche Ablauf der Anpassungsvorgänge und die Entwicklung des Systems werden dargestellt, indem man eine Sequenz derartiger Gleichungssysteme aufstellt, die durch ein Simulationsmodell miteinander verbunden sind. Dieses Verfahren ist kürzlich von einer Expertengruppe der UNESCO ebenfalls für die Behandlung von Umweltproblemen empfohlen worden[1].

Wichtigster Bestandteil von Planungsmodellen der hier geschilderten Art sind die sogenannten Schadstoff-Bilanzen - definitorische Beziehungen -, in denen die Herkunft und der Verbleib der einzelnen Umweltbelastungen festgehalten wird[2]. Für sich allein genommen, beschreiben sie nichts weiter als die einfache Tatsache, daß sich die in einer Region am Ende einer Wirtschaftsperiode[3] feststellbare Belastung (B_s) durch einen Schadstoff s ergibt aus der Anfangsbelastung (A_s) und den in der Periode aufgetretenen Emissionen (E_s), von denen diejenigen Schadstoffmengen abzuziehen sind, die während des betrachteten Zeitraums entweder durch Entsorgungsmaßnahmen der Menschen (M_s) oder durch ökologische Regenerationsvorgänge (R_s) vernichtet werden. Also:

---

1) Vgl. UNESCO, Final Report, Expert Panel on the Rôle of Systems Analysis and Modelling Approaches in the Programme on Man and the Biosphere (MAB), MAB Report Series No. 2, Paris 1972, insbes. S.41 - 43.

2) Ähnliche Konten sind erstmals in der Form von "Material-Bilanzen" von A. Kneese und seinen Mitarbeitern in die Umweltdiskussion eingeführt worden. Vgl. A.V. Kneese, R.V. Ayres und R.C. d'Arge, Economics and the Environment: A Materials Balance Approach, Baltimore 1970.

3) Es sei darauf hingewiesen, daß man den zeitlichen Ablauf des Prozesses darstellen kann, indem man eine Sequenz von Modellen für eine Folge derartiger Wirtschaftsperioden konstruiert.

(1) $A_s + E_s = M_s + R_s + B_s$ $\qquad s = 1,\ldots,S$

Empirischen Gehalt erhält eine solche Definitionsgleichung zwar erst durch die Hinzunahme von technologischen Funktionen oder Verhaltensgleichungen, durch die die einzelnen Variablen zu anderen wirtschaftlichen und ökologischen Größen in Beziehung gesetzt werden. Aber als Bindeglied für die einzelnen Einflußfaktoren - und auch als Rahmen für die Synthese von Forschungsergebnisse aus verschiedenen Disziplinen - ist das Konzept der Schadstoff-Bilanz praktisch unentbehrlich. Einzelne Teile des durch diese Bilanzen beschriebenen Wirkungsgefüges sind zumindes methodisch bereits untersucht worden. Zum Beispiel haben W. Leontief und andere Forsch gezeigt, daß man den Zusammenhang zwischen der emittierten Menge E_s des Schadstoffs s und den verursachenden wirtschaftlichen Aktivitäten X_i analog zu den Input-Beziehungen in einem Input-Output-Modell behandeln kann[1]. Kennt man die Menge d_{si} des Schadstoffs die bei der Produktion einer Mengeneinheit des Gutes i emittiert wird, dann ergibt sich die jeweils zu beobachtende Emissionsmenge E_s nach der Gleichung

(2) $E_s = \sum_i d_{si} X_i$ $\qquad s = 1,\ldots,S$, $i = 1,\ldots,I$

Analog gilt

(3) $M_s = \sum_i c_{si} X_i$ $\qquad s = 1,\ldots,S$, $i = 1,\ldots,I$

---

1) W. Leontief und D. Ford, Air Pollution and the Economic Structure: Empirical Results of Input-Output-Computations, in: A. Brody und A. Carter (Hrsg.), Input-Output-Techniques, Amsterdam 1972, S. 9 ff.
W. Isard, Some Notes on the Linkage of Ecologic and Economic Systems, in: Regional Science Association Papers, 22 (1969), S. 85 ff.; F.R. Försund und St. Ström, Ein Prognosemodell der Umweltverschmutzung in Norwegen, in: P. Menke-Glückert und andere, Planung für den Schutz der Umwelt, Materialien zum Siedlungs- und Wohnungswesen und zur Raumplanung, Band 2, Münster 1973, S. 91 ff.

(2) $E_s = \sum_i d_{si} X_i$ $\qquad s = 1,\ldots,S$, $i = 1,\ldots,I$

Analog gilt

(3) $M_s = \sum_i c_{si} X_i$ $\qquad s = 1,\ldots,S$, $i = 1,\ldots,I$

für diejenigen Aktivitäten, durch die Schadstoffe beseitigt werden. Hier müssen Ergebnisse der prohibitiven Umweltforschung im Modell verarbeitet werden.

Auch die Komponente R_s in Gl. (1), also die je Periode durch natürliche Regenerationsvorgänge abgebaute Schadstoffmenge, ist in ähnlicher Weise auf ihre Einflußfaktoren zurückzuführen. Bezeichnet man diese Einflußfaktoren in Anlehnung an G. Strassert[1] als "wirkungsrelevante ökologische Merkmale der betrachteten Region" (W_k), dann ergibt sich die jeweilige Abbaumenge nach der ökologischen Wirkungsgleichung

(4) $R_s = \sum_k c_{sk} W_k$ $\qquad k = 1,\ldots,K$, $s = 1,\ldots,S$

Solche "wirkungsrelevanten ökologischen Merkmale" sind z.B. die Fließgeschwindigkeit des Wassers, die Hangneigung, die hauptsächliche Windrichtung, die Bodenbeschaffenheit und ähnliche Eigenschaften der Region. Sie sind Gegenstand der funktionalen Umweltforschung. Der Koeffizient c_{sk} gibt dann die Menge des Schadstoffs s an, die in der Region je vorhandene Einheit des betreffenden ökologischen Merkmals in einer Periode abgebaut wird. Die Höhe dieser Koeffizienten wird in der Regel auch von der Belastung in früheren Perioden (oder von der Anfangsbelastung A_s) abhängig sein.

Setzt man die Gleichungen (2) - (4) in die Schadstoff-Bilanz (1) ein und berücksichtigt man zusätzlich die Tatsache, daß die Anfangsbelastung A_s und die Merkmale W_k in der jeweils betrachteten Periode als Konstante angesehen werden müssen, dann zeigt sich, daß eine jede Bilanz nunmehr die Beziehung zwischen den wirtschaftlichen Aktivitäten X_i und der resul-

---

1) H.J. d'Alleux, G. Strassert, Typologische Untersuchung zur Landschaftsplanung; Forschungsauftrag des Bundesministers für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten; Bonn 1973, unveröffentlichtes Manuskript

tierenden Umweltbelastung B_s angibt, wie dies auch beim Simulationsmodell des MIT der Fall ist. In Umkehrung des vom MIT angewendeten Verfahrens wird das Gleichungssystem aber jetzt nicht nach B_s für vorgegebene X_i gelöst, sondern es werden als Hauptziele Schwellenwerte (Umwelt-Standards) vorgegeben, über welche die durch wirtschaftliche Aktivitäten verursachten Belastungen nicht hinausgehen dürfen:

$$(5) \quad B_s \leq \overline{B}_s \qquad s = 1,\ldots,S$$

Zielformulierungen nach der Art einer solchen Schutzvorschrift sind dem Wirtschaftswissenschaftler aus der Theorie der Wirtschaftspolitik bekannt. Sie werden dort als (einseitig) fixierte Ziele bezeichnet und spielen insbesondere in der Entwicklungsprogrammierung eine große Rolle. Bei einer Übertragung dieses Konzepts auf den Bereich des Umweltschutzes müssen solche Ziele auf Vorschlag von Ökologen in einem politischen Zielfindungs- und Entscheidungsprozeß fixiert werden.

Soviel zu den ökologischen Hauptzielen, die noch durch Arbeitsplatz- und Versorgungsstandards und durch Kapazitätsschranken ergänzt werden müssen. Formuliert man als Nebenziel die Forderung nach Maximierung der Produktion

$$(6) \quad \sum_i X_i \longrightarrow \text{Max} \qquad i = 1,\ldots,I$$

dann gibt die Lösung des Modells diejenige Kombination von wirtschaftlichen Nutzungen an, bei der einerseits die Grenzen des Wachstums ($\overline{B}_s$) strikt eingehalten werden, bei der aber andererseits auch nicht unnötig auf die Befriedigung wirtschaftlicher Ansprüche verzichtet wird[1]. Auf diese Weise vermittelt ein solcher ökologischer Lastplan die Kenntnis über die Grenzen des Wachstums hier und heute.

---

1) Es versteht sich von selbst, daß bei dieser Lösung zugleich die volkswirtschaftlichen Kosten minimiert werden.

Die Beachtung dieser Grenzen würde das Eintreten der prognostizierten Umweltkatastrophe verhindern.

Nachdem oben das Prinzip unseres Vorgehens zur Lösung der gestellten Aufgabe skizziert worden ist, sollen nunmehr die Umweltbereiche dargestellt werden, auf deren Behandlung sich das Projekt zur Zeit erstreckt. Diesem Zweck dient der schematische Überblick[1] über das Modell in Schaubild 1.

In diesem Schema sind die von uns untersuchten Zusammenhänge für eine einzelne Region und eine einzelne Periode angegeben. Wie bereits erwähnt, bringt es keine prinzipiellen Schwierigkeiten mit sich, auch das dynamische Verhalten der Variablen zu erfassen. Voraussetzung hierfür ist nur, daß eine Sequenz von Modellen dieses Typs aufgestellt wird, die dem zeitlichen Verlauf des Entwicklungsprozesses und der Abfolge der notwendigen Entscheidungen entspricht. In dem Teil des Simulationsmodells, der die einzelnen zeitlichen Stufen miteinander verbindet, wird dann die Tatsache festgehalten, daß die Anfangsbelastung einer Periode gleich dem aus der Vorperiode übernommenen Endergebnis ist. Vor allem können hier alle nichtlinearen Anpassungsvorgänge der Variablen erfaßt werden.

Ähnlich einfach kann die Verallgemeinerung dieses Schemas für den Fall eines Mehr-Regionen Modells geschehen: Das Schema enthält bereits Spalten zur Erfassung derjenigen Mengen, die die Grenzen der betrachteten Region überschreiten. Besonders wichtig sind im Rahmen der Regionalpolitik die Güterbewegungen über die Regionsgrenzen, weil sie den Grad der interregionalen Arbeitsteilung (und damit gewissermaßen des Exports von Umweltschäden) beschreiben. Nicht weniger wichtig ist aber auch der direkte Export und Im-

---

1) Die Darstellung wurde dem Stand der Arbeiten vom Februar 1973 angepaßt. Sie weicht deshalb in einer Reihe von Punkten von der in Freckenhorst vorgestellten ab. Vgl. auch R. Thoss, Zur Planung des Umweltschutzes, in: Raumforschung und Raumordnung, 30 (1972), S.187.

port von Schadstoffen, sei es nun, daß er durch die Luftbewegung bewirkt wird, daß Schadstoffe im Vorfluter durch das Oberflächenwasser von einer Region in die andere befördert werden, oder daß die Lieferung - wie bei den festen Abfallstoffen - durch den direkten Versand unter Einsatz von Verkehrsmitteln erfolgt. Die Einbeziehung zusätzlicher Regionen vollzieht sich dann in der Form, daß für jede neue Region unter Beachtung ihrer Besonderheiten ein Modell nach dem obigen Schema angefertigt wird. Unter Benutzung der tautologischen Beziehung, daß die Exporte der einen Region gleich den Importen der anderen sein müssen (und umgekehrt), läßt sich dann leicht das multiregionale Modell erstellen (Schaubild 2).

2 Submodelle

Das System des Gesamtmodells ist von uns in Subsysteme aufgeteilt worden, die sich mit einzelnen Teilaspekten des Umweltschutzes beschäftigen. Dieses Vorgehen hat allein arbeitstechnische Gründe, weil die einzelnen Problemkreise bei jedem Bearbeiter den Erwerb von Spezialkenntnissen auf dem betreffenden Gebiet voraussetzen. Die Aufspaltung in Partialmodelle läßt den Mitarbeitern einen gewissen Spielraum, die Modellspezifikation der Natur des Problems und der verfügbaren Datenbasis anzupassen. Für die Synthese zu einem integrierten Modell des Umweltschutzes ist dies ohne Belang, weil bei der Definition der Aktivitäten auf eine genaue Übereinstimmung in allen Submodellen geachtet wurde.

Z.Zt. werden folgende Submodelle bearbeitet:

1. Flächennutzung
2. Abfall
3. Abwasser
4. Trink- und Brauchwasser
5. Abgase
6. Energie
7. Verkehr

Schaubild 1: Schematischer Überblick über ein Umweltplanungsmodell für eine Region

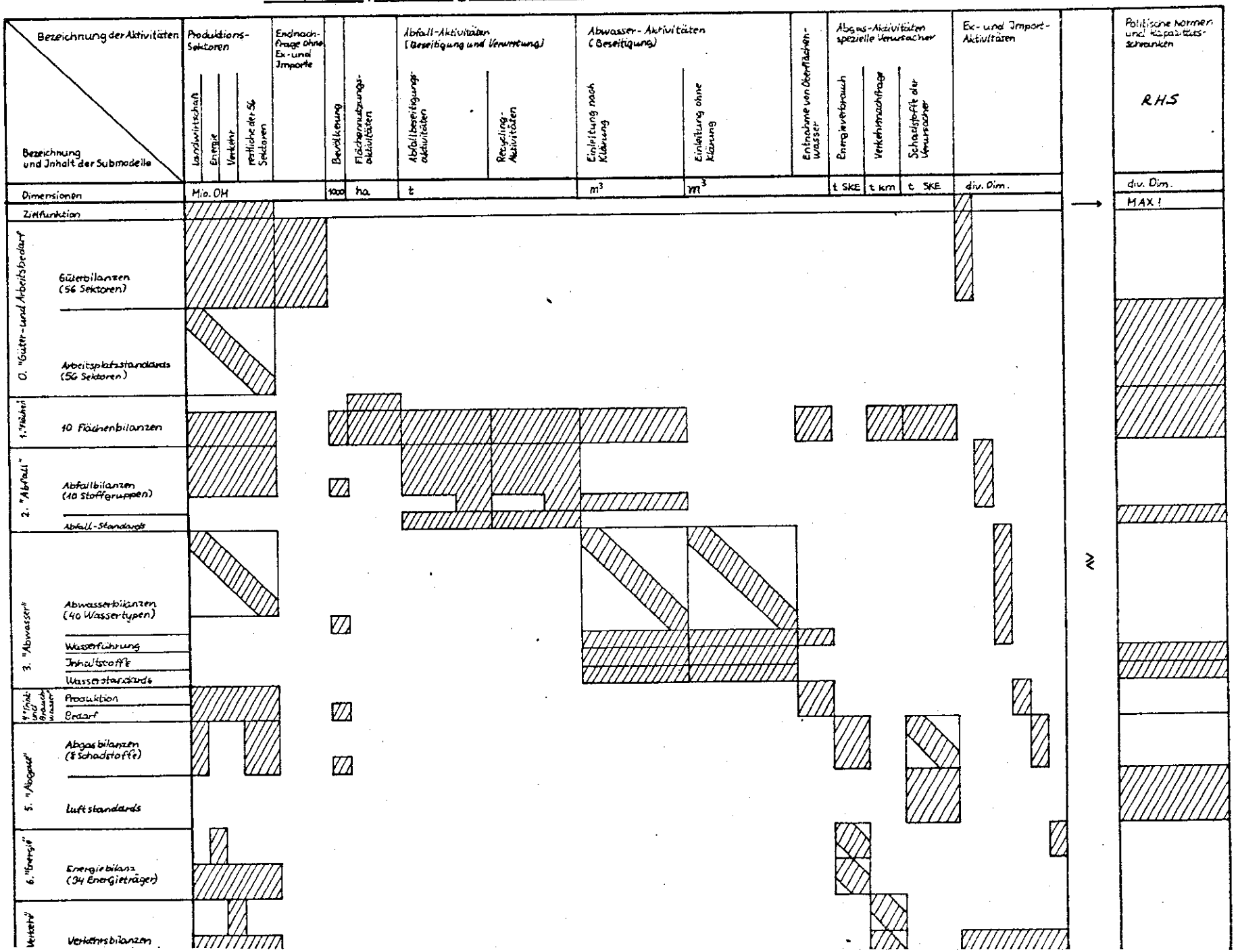
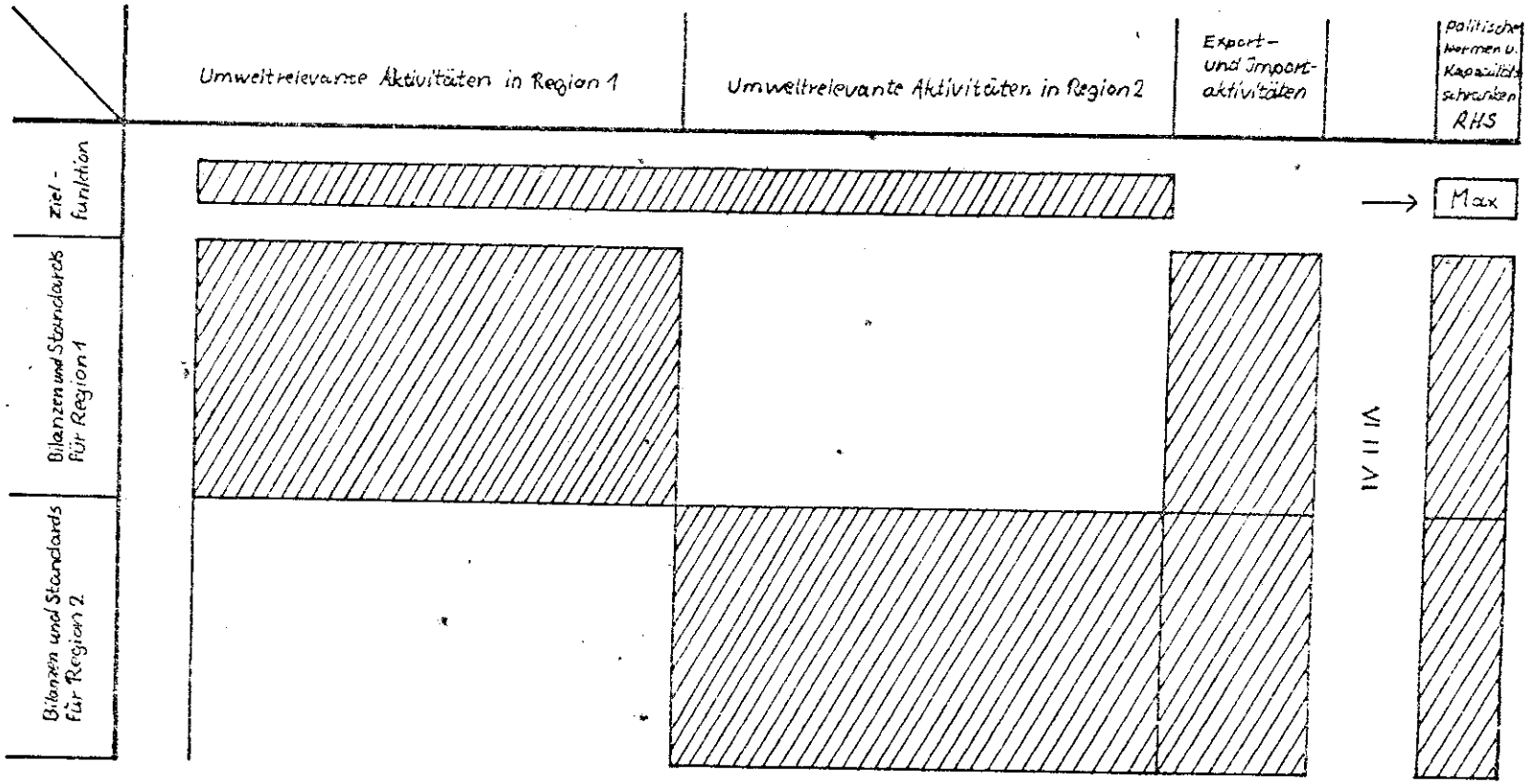


Schaubild 2 : Überblick über ein schematisiertes 2 - Regionen-Modell



Alle Submodelle werden, soweit sie sich mit der gewerblichen Produktion beschäftigen, eine stark disaggregierte Gliederung der Verursacherbranchen enthalten. Dieser Umstand macht die Einbeziehung eines Input-Output-Systems zur Erfassung der über den Bezug von Vorleistungen und Zwischenprodukten bestehenden Verbindungen zwischen den einzelnen Sektoren erforderlich. Hierzu scheint es am zweckmäßigsten, das Input-Output-Modell des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, Berlin, zu verwenden[1]. Zur Erfassung der Produktionsmöglichkeiten in den einzelnen Branchen an den verschiedenen Standorten wird auf die Beschäftigtenzahlen aus der Industrieberichterstattung zurückgegriffen.

Der Gesamtansatz geht von den Intentionen aus, die Systemzusammenhänge und die Interdependenzen bei den Umweltfragen hervorzuheben. Dieser Ansatz wäre ohne vollständige Erfassung der Verursachergruppen unbefriedigend, denn ein solcher Lösungsansatz könnte bei der Auswahl potentieller Umweltstrategien - aufgrund unzureichender Ursachenanalyse - zu nicht optimalen Entscheidungen führen.

Die Verklammerung der Submodelle ist aus Schaubild 1 ersichtlich. Dabei handelt es sich um die graphische Darstellung der Zielfunktion und der Restriktionen, denen die umweltbeeinflussenden Aktivitäten in einer Region genügen sollen. An den schraffierten Stellen der Koeffizienten-Matrix und des Vektors auf der rechten Seite werden numerische Koeffizienten erwartet, die von Null verschieden sind und deren Multiplikation mit den (gesuchten) Aktivitätsniveaus die linke Seite der Gleichungen und Ungleichungen des Modells ergibt. Die rechte Seite bilden Kapazitätsrestriktionen und Umweltstandards.

---

1) Stäglin, R. und Wessels, H., Input-Output-Tabellen und Input-Output-Analysen für die Bundesrepublik Deutschland; DIW-Beiträge zur Wirtschaftsforschung, H.6, Berlin 1969.

Die Darstellung zeigt, daß das Modell horizontal in Submodelle aufgeteilt ist. In diesem werden jeweils die in der Kopfzeile beschriebenen Aktivitäten benutzt. Die graphische Darstellung des Aufbaus der Matrix soll insbesondere die Anschlußstellen und Überlappungen der Submodelle sichtbar machen. Überlappungen (und damit die Notwendigkeit zu genauen Übereinkünften zwischen den Sachbearbeitern) liegen überall dort vor, wo zwei oder mehrere Submodelle die gleichen Aktivitäten benutzen.

Die Submodelle 6 und 7 können als disaggregierte Analyse der auch im Submodell 0 enthaltenen Sektoren "Energie" und "Verkehr" interpretiert werden. Ähnliches gilt für die Beziehung zwischen landwirtschaftlicher Flächennutzung im Submodell 1 und dem Sektor "Landwirtschaft" etc. Die Aussonderung dieser Sektoren ist notwendig, weil hier zur Analyse der Umweltschäden eine feinere Unterteilung erforderlich ist als für die Analyse der Vorleistungsverflechtung.

P. Brasse, R. Thoss, U. Könnecke

Ein aktivitätsanalytisches Umweltmodell zur Flächennutzungsplanung[1]

1 Ansatz und Ziel des Flächennutzungsmodells

Seit einiger Zeit gewinnen bei der Diskussion um Flächennutzungsprobleme Umweltschutzgesichtspunkte zunehmend an Bedeutung. Das Flächennutzungsmodell wurde unter besonderer Berücksichtigung umweltrelevanter agrarischer Flächenansprüche erstellt, weil Forderungen nach wachsender Wald-, Gewässer- und Grünfläche zur Regeneration der ehemals 'freien Güter' Wasser und Luft wie auch für die Freizeitgestaltung und Erholungsmöglichkeiten der Bevölkerung mit Flächenansprüchen für die landwirtschaftliche Nahrungsmittelerzeugung zu konkurrieren scheinen. Da landwirtschaftliche Nutzflächen i.d.R. neben der Produktion von Nahrungsmitteln auch einen Beitrag zum Ausgleich von Umweltschäden liefern, muß man davon ausgehen, daß es sich bei der Flächennutzung häufig um Mehrfachnutzungen handelt, d.h. die Funktionen sich überlagern. Ein zusätzlicher Aspekt ergibt sich aus dem Umstand, daß sich die allgemeine Wertschätzung der Kuppelprodukte in Relation zu den agrarischen Hauptprodukten neuerdings sehr rasch verändert. Der hieraus möglicherweise entstehende Konflikt wird durch einige andere agrarpolitische Tatsachen zusätzlich tangiert. Durch die steigende Produktivität des Sektors Landwirtschaft kann in der BRD durchaus von Nahrungsmittelüberschüssen gesprochen werden. - Ein weiteres Problem ist die Abwanderung landwirtschaftlicher Arbeitskräfte in andere Wirtschaftssektoren, wodurch u.a. Bracheprobleme entstehen und das Ziel einer wünschenswerten ausreichenden Nahrungsmittelversorgung der BRD aus inländischen Quellen gefährdet werden könnte.

---

1 P. Brasse, Sonderforschungsbereich 26 Raumordnung und Raumwirtschaft, WWU Münster, Münster 1973. Diese Darstellung des Flächennutzungsmodells basiert auf dem von R. Thoss dargestellten Modell, Zur Planung des Umweltschutzes. In: Raumordnung und Raumforschung, 30. Jg., Köln 1972, Heft 4/5, S.180 ff., insbes. S.184 - 190.
Vorarbeiten zu diesem Beitrag wurden von U. Könnecke, Institut für Siedlungs- und Wohnungswesen, Universität Münster, Münster 1973, angefertigt.

Diese kurz umrissenen Zielkonflikte zwingen die Regionalplanung, Flächennutzungsmodelle bzw. Flächenumwidmungspläne zu entwickeln, in die verschiedene Zielvorstellungen eingebracht und in denen diese Ziele auf ihre Konsistenz untersucht werden können. Für ein solches mehrdimensionales Problem eignet sich die lineare Programmierung und soll daher in diesem aktivitätsanalytischen Modell angewendet werde

Unser Modell soll sich an folgenden Zielen und Bedingungen orientieren:

(1) Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln, die im Durchschnitt zu 70 % auf der eigenen Flächen produziert werden.

(2) Ausreichende Versorgung der Bevölkerung mit Flächen für die Freizeitgestaltung und Erholung.

(3) Erhaltung und Erzeugung der Güter sauberes Wasser und reine Luft.

(4) Einsatz des Faktors Arbeit nach Produktivitätsgesichtspunkten, zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der Landwirtschaft und einkommenspolitisch gesicherter Arbeitsplätze.

Ziel der Untersuchung soll sein, dem Politiker eine Hilfe bei der Entscheidung über den Einsatz des Faktors Boden zu geben. Es soll ein Planungsinstrument geschaffen werden, mit dem die verschiedenen Zielvorstellungen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Flächennutzung, den Einsatz des Faktors Arbeit und die Erhaltung von Wasser, Luft und Regenerationsmöglichkeiten für die Bevölkerung quantifiziert werden können.

Dieses Modell ist so konzipiert, daß es in das bei Thoss[1] beschriebene Gesamtmodell integrierbar ist und dann durch

---

1 Vgl. Thoss, R., Zur Planung des Umweltschutzes, a.a.O., S.184 ff.
Vgl. derselbe, Bericht über das Projekt "Umweltbilanzen und ökologische Lastpläne für Regionen"; in: DFG-Mitteilungen 2/73, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Umweltforschung, S.47 - 59.

die Einbeziehung der in den weiteren Modellen vorhandenen Flächenbilanzen und einige noch zu erläuternde Erweiterungen komplettiert werden kann und soll.

2. Beschreibung des Flächennutzungsmodells

2.1 Allgemeiner Aufbau des Modells

Der Aufbau des Modells geht aus dem Simplextableau in Schaubild 1 hervor. Es handelt sich hierbei um das von Thoss bereits vorgestellte Flächennutzungstableau in etwas veränderter Form:[1]

(1) Die Aktivitäten, die sich in flächenabhängige und Veredlungsaktivitäten gliedern.

(2) Die diesen Aktivitäten zugeordneten Eignungen und Güter.

(3) Die den Eignungen und Gütern auferlegten unteren und oberen Kapazitätsschranken und politischen Normen.

(4) Die für die verschiedenen landwirtschaftlichen Produktionen, die für Belange des aktiven und passiven Umweltschutzes und die für die Beschaffung von Regenerationsmöglichkeiten der Bevölkerung einzusetzenden Arbeitskräfte.

In termini der quantitativen Wirtschaftspolitik ist der in der Zielfunktion zu maximierende oder zu minimierende Wert das flexible Ziel einer Untersuchung. Da, wie bereits angedeutet, die benötigten Arbeitskräfte so eingesetzt werden sollen, daß den steigenden Ertragskoeffizienten pro Arbeitskraft und Hektar und der gleichzeitigen Freisetzung von Arbeitskraft Rechnung getragen werden soll, ist die Minimierung des jährlichen Bedarfs an Arbeitskraft flexibles Ziel der Untersuchung.

Der Zusammenhang zwischen (1) Aktivitäten, (2) deren Eignung, (3) Nebenbedingungen, d.s. politische Normen und Kapazitätsrestriktionen, und (4) Minimierung von Arbeitskraft ergibt folgende Optimierungsaufgabe:

---

1 Vgl. Thoss, R., Zur Planung des Umweltschutzes, a.a.O., S. 189.
U Könnecke, Institut für Siedlungs- und Wohnungswesen, Universität Münster, Münster 1973.

AKTIVITÄTEN / NEBENBEDINGUNGEN	bebaute Fläche	Hofffläche	Naturschutzwasser	Wasserspeicher	Fisch.-gewässer	F.+E.-Gewässer	Sportplätze	F.+E.-Wiesen/Parks	Oedland/Brache	unkult.Moor	Naturschutzwald	Wirtschaftswald	Obstland	Rebland	Gartenland	Baumschulen	sonst.Handelsgew.	Freilandgemüse	Brotgetreide	Saatgetreide	Futtergetr.I	Futtergetr.II	Hülsenfrüchte	Speisekartoffeln	Saatkartoffeln	Futterkartoffeln	Futterrüben	Zuckerrüben	Ackerfutterpfl.I	Ackerfutterpfl.II	Ackerfutterpfl.III	Wiesen I	Wiesen II	Wiesen III	Weide II	Weide I	Skipisten	Gärfutter	Heu I	Heu II	Schweinehaltung	Schafhaltung	Rindermast	Milchproduktion	Pferdehaltung	Geflügelmast	Legehennenhaltung	KAPAZITÄTS-RESTRIKTIONEN V. POL. NORMEN (R H S)
													GARTENLAND																																				PROD
DIMENSIONEN	1000 ha.																																																	- VIEHEINHEITEN -
EIGNUNG DER FLÄCHE FÜR: Gesamtfläche	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												= 24777
Gewässermaximum			1	1	1	1																																											≤ 600
Moormaximum										1																																							≤ 110
Obst-u.Reblandmax.													1	1																																			≤ 200
Getreidemax.																			1	1	1	1																											≤ 5625
Hackfruchtmax.																								1	1	1	1	1																					≤ 5700
Zuckerrübenmax.																												1																					≤ 350
Ackerlandmax.																	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																		≤ 7539
Grünlandmax.																																1	1	1	1	1	1												≤ 13000
Skimaximum																																					1												≤ 200
NEUE FLÄCHENANSPRÜCHE FÜR: F.+E.-wasser/Ski						1																															1												≥ 37
F.+E.(intensiv)								1	0.2																																								≥ 11
P.+E.(extensiv)							1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	1											≥ 12.000
Gewässerminimum			1	1	1	1																																											≥ 443
Naturschutzmin.			1							1	1																																						≥ 1.050
Waldminimum											1	1																																					≥ 4.955
Waldmaximum											1	1																																					≤ 12.400
HERKÖMMLICHE FLÄCHENANSPRÜCHE FÜR: beb.Fläche	1																																																= 1615
Hofffläche		-1																	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03		0.03	0.03		0.25				0.05	0.005	0.005	0.01	0.01	0.02	0.001	0.001	= 0
Auslauf																																		0.5	1.0	0.9			-0.01	-0.04	-0.08	-0.2	-0.2			≥ 0
Fische					0.1																																												≥ 15
Holz												5.5																																					≥ 39.639
Obst													9.5																																				≥ 846
Reben														10.66																																			≥ 9.889
Gartenerzeugnisse															25																																		≥ 8.525
Baumschulerzeugn.																13.3																																	≥ 227
sonst.Handelsgew.																	13.4																																≥ 1.389
Freilandgemüse																		3.7																															≥ 210
Brotgetreide																			35																														≥ 8.316
Saatgetreide																			-0.12	3.38	-0.22	-0.22																											≥ 0
Schweinefutter																					3.3					5.4	8.98	2.7											-0.5									≥ 0
Futtermischung A																					0.9					-5.4																							≤ 0
Futtermischung B																					2.1						-8.98																						≤ 0
Futtergetreide																						3.3																		-0.007	-0.16	-0.16	-0.2	-0.015	-0.015	≥ 0
Hülsenfrüchte																							3.1																										≥ 92.54
Speisekartoffeln																								6.0																									≥ 1.378
Saatkartoffeln																								-0.401	-0.015	-0.001																							≥ 0
Zuckerrüben																												11.0																					≥ 3.332
Gärfutter																												-1.95	5.1			3.2						-1.0											≥ 0
Heuproduktion																														5.1			3.2		1.6				1.0	1.0									≥ 0
Sommerfutter																															5.1			3.2	1.0	3.2	3.2				-0.286	-0.401	-0.401	-2.057				≥ 0
Winterfutter I																																						1.0	1.0		-0.285	-0.183	-0.183					≥ 0
Winterfutter II																																							1.0					-0.285				≥ 0
Schweinefleisch																																								0.1									≥ 2.122
Schaffleisch																																									-0.025								≥ 10
Rindfleisch																																										-0.073	-0.073					≥ 1.207
Milch																																											-3.713					≥ 2.222
Pferde																																												1.0				≥ 260
Geflügel																																													-0.057			≥ 258
Eier																																														0.216		≥ 14.108
ZIELFUNKTION: jährl.Bedarf an Arbeitskraft (VAK/ha)							12	11.63				6	215.8	215.8	227	227	227	227	99.9	17.03	17.03	17.03	17.03	17.03	88.46	88.46	88.46	99.85	99.85	11.63	11.63	11.63	9.75	9.75	9.75	11.63	9.75	9.68			1.7	3.44	4.77	30.68	0.33	0.273	0.17	→ min.

Minimiere den Bedarf an Arbeitskraft unter Einhaltung der für den Input und Output der Aktivitäten formulierten Kapazitätsrestriktionen und politischen Normen!

Diese Formulierung bedeutet also nicht, daß die Verringerung von Arbeitskräften hervorragendes politisches Ziel unserer Untersuchung ist, sondern daß dieser Verringerung durch die unbedingt einzuhaltenden ebenfalls politischen Ziele und Kapazitätsbestimmungen der rechten Seite (RHS) eindeutige Grenzen gesetzt werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Minimierung des Arbeitseinsatzes politisch vertretbar.

Durch die Lösung des Gleichungssystems wird unter Beachtung der auf der rechten Seite (RHS) stehenden minimalen, maximalen und fixen Gütermengen das Niveau der einzelnen Flächennutzungsaktivitäten ermittelt, das zu einem insgesamt minimalen Einsatz an Arbeitskräften führt. D.h. am Ende der Rechenoperation ergibt sich ein bestimmtes Niveau der Flächennutzungs- und Veredlungs-Aktivitäten, das entsprechend den Nebenbedingungen und der Minimierungsvorschrift als mathematisch optimal bezeichnet werden kann. Ob und/oder inwieweit das optimale Niveau auch wirtschaftspolitisch wünschenswert ist, ergibt sich aus der Diskussion der Ergebnisse und der daraus folgenden, möglicherweise stattfindenen, Zielrevision der politischen Akteure.

2.2 Aktivitäten und Nebenbedingungen des Modells[1]

In Schaubild 1 erhält jede Aktivität eine Spalte des Tableaus; deren Eignung, Inputs und Outputs sowie die zugehörigen Restriktionen ergeben in den Zeilen des Tableaus Gleichungen und Ungleichungen, die insgesamt ein Gleichungssystem (m.a.W. die Matrix) darstellen, das simultan gelöst werden soll.

---

1 Die in Hochkommata gesetzten Begriffe sind die Benennungen der Aktivitäten und Restriktionen des Schaubildes 1.

Bei den Aktivitäten bestehen die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale darin, daß es 'Flächenabhängige Aktivitäten' und indirekt flächenabhängige gibt; letztere sind die 'Veredlungsaktivitäten'. Diese beiden Gruppen sind tief gegliedert, was der Kopfzeile des Schaubilds 1 zu entnehmen ist.

Jede Aktivität hat Güterinputs und Güteroutputs. Die Input- bzw. Outputkoeffizienten erkennt man am negativen bzw. positiven Vorzeichen. Somit geben die Eintragungen in den Spalten der jeweiligen Aktivitäten an, welche bzw. wieviele Güter pro 1000 ha produziert werden, welche Flächennutzungsarten benötigt werden, durch welche Flächenrestriktionen auf der RHS die Güterproduktionen limitiert werden, bzw durch welche Güterrestriktionen Flächenansprüche geltend gemacht werden und wieviel Arbeitskraft ggf. benötigt wird, um eine Einheit eines Gutes zu produzieren bzw. zu bewirtschaften. In termini des Modells sind nicht nur landwirtschaftliche Produkte Güter, sondern auch die Freizeit- und Erholungsmöglichkeiten der Bevölkerung, Wasser, Luft, Naturschutz etc. - Da es sich bei der Flächennutzung häufig um Mehrfachnutzungen handelt, haben die meisten Aktivitäten des Modells mehrere Outputs. Dargestellt wird dies durch die mehrfachen positiven Eintragungen in den jeweiligen Spalten, was bedeutet, daß in diesen Fällen mehrere erwünschte Outputs simultan erzeugt werden.

Bei den Restriktionen, also den Kapazitätsschranken und politischen Normen, unterscheiden wir zwischen 'Herkömmlichen Flächenansprüchen', 'Neuen Flächenansprüchen' und der 'Flächeneignung'.

Unter dem Begriff der Flächeneignung sind die Bilanzen zusammengefaßt, welche die in der betrachteten Region[1] verfügbaren Flächen verschiedener Qualtität beschreiben.

---

1 Bei diesem Modell ist die BRD die betrachtete Region; die numerischen Eintragungen im Tableau sind folgenden Quellen zu entnehmen:
BLV Agrarstatistik, Landwirtschaft und Ernährung in EWG EFTA und weiteren Ländern. Zusammengestellt und bearbeitet von Dr. Herbert Völkl, München, Basel, Wien 1969.
Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1971, hrsg. vom Bundesminister für Ernährung Landwirtschaft und Forsten, Hamburg und Berlin 1971.
Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1971, hrsg. vom Statistischen Bundesamt, Wiesbaden 1971

Die herkömmlichen Flächenansprüche können auch als herkömmliche Ziele bezeichnet werden. Sie beziehen sich auf die Nutzung des Bodens als Bauland und als Grundlage land- und forstwirtschaftlicher Produktion. In diesen Bereich fallen auch die Ziele bzw. politischen Normen, die sicherstellen sollen, daß 70 % der Nahrungsmittel auf inländischen Böden hergestellt werden sollen, um eine Mindestversorgung der Bevölkerung zu sichern.

Unter neuen Flächenansprüchen verstehen wir die Bereiche, die im Zusammenhang mit dem Umweltschutz zu sehen sind. Aufgenommen wurden in das Modell der Flächenbedarf für:
- Freizeit- und Erholungsmöglichkeiten,
- Wassergewinnungsmöglichkeiten,
- Grünflächen für die Reinhaltung der Luft hinsichtlich Staub und für die Regeneration der Luft,
- Wald- und Wasserflächen zur Beeinflussung des Klimas,
- den Naturschutz.

Im folgenden sollen nun einige Gleichungen und Ungleichungen, die beispielhaft für andere stehen und die die Funktionsweise des Modells verdeutlichen, näher erläutert werden.

Im Modell sind drei definitorische Gleichungen enthalten. Es handelt sich um die Gleichungen 'Gesamtfläche', 'bebaute Fläche' und 'Hoffläche'. - Die Gleichung für die Gesamtfläche sagt aus, daß die verschiedenen flächenabhängigen Aktivitäten sich in die insgesamt nicht vermehrbare Gesamtfläche teilen müssen. - In der Gleichung bebaute Fläche steht, daß diese auf eine bestimmte Fläche festgeschrieben ist. - Die gesamte Hoffläche setzt sich aus den Flächenbestandsteilen zusammen, die für die Produktion oder Lagerung bestimmter landwirtschaftlicher Güter benötigt werden.

Die verschiedenen Flächeneignungen sind dem Gleichungsblock Eignung zu entnehmen, deren jeweilige maximale Ausdehnung durch Kapazitätsschranken und politische Normen (≤ - Bedingungen) einseitig fix sind. - Als Beispiel sei hier die Gleichung 'Gewässermaximum' herausgegriffen. Die gesamte Wasserfläche besteht aus vier Komponenten, deren gemeinsame Fläche 600 Einheiten nicht überschreiten darf. Die Höhe der einzelnen Komponenten wird durch die interdependenten Restriktio-

nen, die aus den in der gleichen Spalte stehenden Koeffizienten und diesen zugehörigen Restriktionen zu ersehen sind, simultan in der Optimierungsrechnung bestimmt. -

Bei den neuen Flächenansprüchen werden mit der Ausnahme von 'Waldmax.' bestimmte untere Grenzen definiert, die nicht unterschritten werden dürfen. Diese Maßnahme sichert, daß die oben im einzelnen aufgeführten Umweltschutzmaßnahmen und deren Erfolg nicht unter ein bestimmtes wünschenswertes Niveau fallen können; m.a.W. in diesen Restriktionen erkennt man die Umweltgütestandards, die unserem Modell zugrundeliegen. - So soll z.B. die Wasserfläche ein Niveau vo 443 Einheiten nicht unterschreiten. Da zudem bereits eine ob ste Grenze vorgeschrieben wurde, geht aus diesem Zusammenha hervor, daß wir viele Wasserflächen zwar für wünschenswert halten, wegen der natürlichen Gegebenheiten diesem Wunsch Grenzen nach oben gesetzt sind. - Ähnlich verhält es sich bei den Gleichungen Waldminimum bzw. -maximum. Hier sind wi der Ansicht, daß Wald an sich wünschenswert ist, also ein b stimmtes unterstes Niveau vorhanden sein sollte, zuviel Wal aber den Erholungswünschen der Bevölkerung entgegensteht, d Waldsäume abwechslungsreicher als zusammenhängende große Wä der sind.

Im Zusammenhang mit den neuen Flächenansprüchen ist die Gle chung Freizeit und Erholung extensiv ('F. + E. (ext.)') erwä nenswert. Die Aktivitäten, deren Flächen wir mit Eins gewic tet haben, halten wir für voll geeignet für extensive Erholungs- und Freizeitmöglichkeiten; bei den Aktivitäten wie 'Obst- und Gartenland', 'Ackerland' und überwiegend auch be 'Dauergrünland' hingegen waren wir der Ansicht, daß diese F chen nur zu Bruchteilen der extensiven Freizeitgestaltung d nen. Hier sind also Normierungen vorgenommen worden, die ni explizit auf der rechten Seite (RHS) erscheinen. Durch Umst lungen oder aufwendigere Formulierung des Rechenproblems si i.d.R. explizite Normierungen auf der RHS möglich. Schon oben zeigte sich, daß Gleichungen und Ungleichungen nicht s parat betrachtet werden dürfen, vielmehr die Interdependenz der verschiedenen Restriktionen gesehen werden müssen, so d klar wird, daß es sich hier um ein Gleichungssystem handelt das simultan gelöst wird.

So wäre z.B. aus der Gleichung 'F. + E. (ext.)' für sich denkbar, daß sich für die Aktivität 'F. + E.-Gewässer' ein Niveau von 650 Einheiten ergäbe. Da aber bereits durch die Gleichung 'Gewässermaximum' bestimmt wird, daß die Wasserfläche insgesamt 600 Einheiten nicht überschreiten darf, wird die Abhängigkeit bzw. die Simultaneität der Bestimmung der Aktivitätenniveaus untereinander deutlich.

Da die in Schaubild 1 gezeigte Matrix aus einer Vielfalt von Abhängigkeiten der Aktivitäten untereinander besteht, soll auf eine weitere Erörterung der Interdependenzen des Gleichungssystems verzichtet werden.[1]

Aus der 'Zielfunktion' geht hervor, daß zur Bearbeitung verschiedener Flächenaktivitäten und zur Produktion verschiedener landwirtschaftlicher Produkte unterschiedlicher Bedarf nach Arbeitskräften ausgeht. Dies ist insofern von besonderer Bedeutung, da wegen der Minimierungsforderung im Optimierungsprozeß die Aktivitäten auf ein möglichst minimales Niveau herabgedrückt werden, die den höchsten Bedarf an Arbeitskraft haben, et vice versa. Die zugrundeliegenden linear-limitationalen Funktionen bewirken, daß das maximale oder das minimale Niveau einer Aktivität dann erreicht ist, wenn eine der zugehörigen Kapazitätsschranken erreicht wird oder m.a.W., das minimale Niveau des Einsatzes des Faktors Arbeit ist dann erreicht, wenn eine oder mehrere der Nebenbedingungen an ihrer unteren oder oberen Grenze für das gesamte System bindend werden.

2.3 Beispiele[2]

Mit zwei Beispielen soll das Modell veranschaulicht und gezeigt werden, wie der Zuordnungsprozeß verläuft.

---

1 Vgl. 2.3 Beispiele und Schaubilder 2, 3, 3a.
2 U. Könnecke, Beispiele und Schaubilder, Institut für Siedlungs- und Wohnungswesen, Universität Münster, Münster 1973.

SCHAUBILD 2

	WIRTSCHAFTSWALD	RHS
⋮	⋮	⋮
HOLZ	5,5	≥ 39.639

SCHAUBILD 3

	FUTTERGETR.I	FUTTERKART.	FUTTERRÜBEN	ZUCKERRÜBEN	SCHWEINEHALTUNG	RHS
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
SCHWEINEFUTTER	+3,3	+5,4	+8,98	+2,7	-0,5	≥0
FUTTERMISCH. A	+0,9	-5,4				≥0
FUTTERMISCH. B	+2,1		-8,98			≥0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
JÄHRL. BEDARF AN ARBEITSKRAFT	17,3	88,65	99,53	99,53	1,7	

SCHAUBILD 3a

SCHWEINEFUTTER	+5129,2	+1418,87	+3263,96	+817,9	-10610	≥0

Beispiel 1 (Schaubild 2)

Der Outputkoeffizient der Aktivität 'Wirtschaftswald' beträgt 5,5, d.h. pro 1000 ha Wirtschaftswald wurden 1970 5,5 tsd. Festmeter (Fm) Holz geschlagen und verarbeitet. In der Restriktion 'Holz' wird die Produktion von mindestens 39.639 tsd. Fm Holz auf der Fläche der BRD gefordert. Der Aktivität 'Wirtschaftswald' wird dann mindestens soviel Fläche zugeordnet, daß die in der Restriktion 'Holz' verlangte Produktionsleistung von mindestens 39.639 tsd. Fm erbracht werden kann. Im Ergebnis weist das Modell dieser Aktivität 7.207 tsd. ha zu. Der Outputkoeffizient multipliziert mit der Fläche ergibt einen Gesamtoutput in der geforderten Höhe an der untersten Grenze; m.a.W. die Forderung nach einer Mindestproduktion von 39.639 tsd. Fm Holz wird erfüllt.

Beispiel 2 (Schaubilder 3 und 3a)

Die Outputkoeffizienten der Aktivitäten 'Futtergetreide', 'Futterkartoffeln', 'Futterrüben' und 'Zuckerrüben' in der Zeile Schweinefutter geben an, wieviel Schweinefutter die Aktivitäten produzieren. Die Maßeinheit für diese Koeffizienten ist t GE/ha u. Jahr. Der Inputkoeffizient der Aktivität 'Schweinehaltung' (-0,5) besagt, daß pro Schwein in jedem Jahr 0,5 t GE des in der BRD produzierten Schweinefutters benötigt werden. Dieses Schweinefutter ist durch die verschiedenen Aktivitäten der inländischen Futtererzeugung (s. Gleichung 'Schweinefutter') zu decken. Da nun ein bestimmtes Mischungsverhältnis im Schweinefutter gewahrt werden muß, werden die beiden Zeilen 'Futtermischung A' und 'Futtermischung B' eingeführt, die das Mischungsverhältnis festlegen.

Die Höhe der Aktivitätsniveaus sind Schaubild 3a zu entnehmen.

3 Erweiterungsmöglichkeiten des Modells

Nachdem das Flächennutzungsmodell in groben Zügen beschrieben ist, sollen nun einige Erweiterungsmöglichkeiten vorgestellt werden.

Schon aus den Ausführungen zum Gesamtmodell von Thoss[1] und dem dort abgebildeten schematischen Überblick geht hervor, daß dieses Modell insbesondere um wesentliche Aspekte des Umweltschutzes zu erweitern ist.

Zu nennen sind hier insbesondere die Bereiche der Submodelle Abfall, Abwasser, Trink- und Brauchwasser, die flächenintensiv sind. Hierbei geht es um die Bereitstellung von Abfalldeponieflächen, Müllkompostunterbringungsmöglichkeiten, Klärschlammunterbringung, Anlagenflächen des Entsorgungsbereichs und die Bereitstellung von Flächen für Wasserwerke, Talsperren und sonstige Wasserdepot- und -beförderungsflächen.

In einem weiteren Bereich müssen Flächen der Industrieansiedlung und des Wohnsiedlungsbaus im Rahmen der Standortsubstitution berücksichtigt werden. Hinzu kommen die benötigten Flächen für den Verkehrswegeausbau und sonstige Infrastrukturausstattungen.

Da durch die verschiedenen Submodelle[2] des Gesamtmodells Teilbereiche des oben beschriebenen Katalogs abgedeckt werden, wurde das hier vorgestellte Modell insbesondere für den Sektor Landwirtschaft und Freizeit- und Erholungsansprüche formuliert. Nach Zusammenfügen der Submodelle nach dem bei Thoss[3] dargestellten Verfahren wird sich zwangsläufig

---

1 Vgl. Thoss, R., Ziel, Ansatz und Methoden eines integrierten Optimierungsmodells zur Verbesserung des Umweltschutzes Gesellschaft für Regionalforschung, Seminarberichte, Heft 8 1973, S.5 ff.

2 Vgl. ebenda, S.10 ff.
Vgl. Wiik, K., Ein multiregionales Entscheidungsmodell zur Optimierung der Abwasserbelastung. Gesellschaft für Regionalforschung, Seminarberichte, Heft 8, 1973, S. 53 - 87
Vgl. Brasse, P., Optimierung der Müllbelastung. Gesellschaf für Regionalforschung, Seminarberichte, Heft 8, 1973, S. 2
Vgl. derselbe, Der Beitrag der Abfallwirtschaft zur Verbesserung des Umweltschutzes. Beiträge zum Siedlungs- und Wohnungswesen und zur Raumplanung, Band 9, Münster 1973, S.87 - 94.

3 Vgl. Thoss, R., Ziel, Ansatz und Methoden, a.a.O., S.11.

eine erhebliche Ausweitung dieses Modells ergeben. Da in die verschiedenen Submodelle Standortüberlegungen mit einbezogen werden müssen, werden die umweltschutzrelevanten Flächenbereiche des obigen Katalogs berücksichtigt sein. Die verbleibenden Probleme, die sich aus regionalpolitischen Besonderheiten ergeben werden, hoffen wir anhand von bereits vorliegenden Arbeiten, die in das Modell integriert werden können, lösen zu können.

Besonders interessante Ergebnisse erwarten wir durch die Änderungen der rechten Seite, d.h. bei der Diskussion verschiedener Zielvorstellungen. Da es bei LP-Modellen der hier vorgestellten Art keine großen Schwierigkeiten mit sich bringt, alternative Strategien und Zielvorstellungen auf ihre Konsistenz hin zu untersuchen, wird es sich anbieten, in verschiedenen Läufen des Rechenprogramms Vorstellungen von Fachleuten und Politikern zu quantifizieren. Gleichfalls wird es möglich sein, in Simulationsläufen Änderungen der Struktur des Sektors Landwirtschaft dynamisch zu erfassen und durch Änderungen der Randbedingungen deren Auswirkungen auf die Stabilität des gefundenen Optimums durch eine Interpretation der Schattenpreise, d.h. der dualen Lösung des Modells, zu quantifizieren.

Peter Brasse

Optimierung der Müllbelastung

1 Zielsetzung

Die Belastung der Umwelt durch Abfälle wird häufig bei bestimmten Beseitigungsmethoden (-aktivitäten), einzelnen Abfallstoffen, speziellen Wirtschaftszweigen, selterner medienbezogen - d.h. an Luft, Wasser und Boden - aufgezeigt. Die sozio-ökonomischen Aspekte der Abfallbeseitigungs- und Verwertungsproblematik werden nicht in der notwendigen interdependenten Beziehung zum ökologischen Problem betrachtet. Eine regionale Besonderheiten berücksichtigende Gesamtschau des Problems wird vernachlässigt.

Es besteht daher die Notwendigkeit, Modelle zu entwickeln, mit denen in absehbarer Zeit mit dem vorhandenen statistischen Material ein Nachweis der quantitativen wie qualitativen regionalen Belastung durch flüssige, schlammige und feste Abfallstoffe aus Produktion, Konsumtion und Beseitigung sowie Verwertung gelingen kann, die die Interdependenzen zwischen den Medienträgern und der Entstehung der Abfälle aus verschiedenen Güterverwendungen berücksichtigen, die sich zur Maßnahmenplanung eignen und es ermöglichen, die Auswirkungen dieser Planungen auf die ökologische und sozio-ökonomische Umwelt zu qualifizieren und zu quantifizieren.

2 Abfallwirtschaftliche Voraussetzungen für das Modell

Da es sich bei festen, schlammigen und flüssigen Abfällen um Güter handelt, die aus verschiedenen wirtschaftlichen und soziologischen Gründen zu Abfall deklariert werden, muß nicht nur der 'klassischen' Abfallbeseitigung sondern auch der volkswirtschaftlichen Nutzung dieser Abfälle nicht zuletzt aus Gründen der Ressourcenplanung besonders Rechnung getragen werden. Die Belastung der Umwelt mit Abfällen ist die Endstufe komplizierter Produktions- und

Konsumtionsprozesse; einzubeziehen sind hier die Belastungen aus abfallwirtschaftlichen Aktivitäten.

Die in einem abfallwirtschaftlichen Modell zu berücksichtigenden Kennzeichen dieser Prozesse sind:

1. Die mit der Produktion von Gütern einhergehenden Kuppelproduktionen (direkter Abfallanfall).
2. Die Verwendung der produzierten Güter (direkter Abfallanfall).
3. Die 'Kuppelproduktionen' des abfallwirtschaftlichen Bereichs (indirekter Abfallanfall).

Im ersten Problemkreis werden die Kuppelprodukte zu Abfall, für die nach einzelwirtschaftlicher Betrachtungsweise keine weitere wirtschaftliche Verwendung möglich ist. - Die einzelwirtschaftliche Betrachtungsweise berücksichtigt die Parameter, die den möglichen Zielerfüllungsgrad der Unternehmen determinieren. Hierbei muß davon ausgegangen werden, daß aufgrund unterschiedlicher Zielvorstellungen, Wettbewerbssituationen, Kapitalausstattungen, Standort- und Absatzbedingungen, gesetzlichen Vorschriften u.v.a.m. stofflich gleiche Abfälle sowohl weiterverarbeitet (recycled) wie auch zu Abfall deklariert werden können.- Weiterhin darf nicht vergessen werden, daß bei der Weiterverarbeitung wie auch bei der Beseitigung i.d.R. neue Kuppelproduktionsprozesse in Gang gesetzt werden wie auch an anderen Stellen der ökologischen Bilanz Belastungen entstehen können (z.B. Energiebilanz, Abwasserbilanz; s. hierzu die Ausführungen zum Gesamtmodell). Auf den letzten Aspekt wird bei einer optimalen abfallwirtschaftlichen Lösung besonders zu achten sein.

Im zweiten Problemkreis ist zu untersuchen, ob die produzierten Güter für den Verbrauch in Produktion oder Konsum oder für dauerhafte Nutzungen vorgesehen sind.- Hieraus ergeben sich Rückkoppelungen auf den Produktionsprozeß, wenn man davon ausgeht, daß bei Gütern, deren Kurzlebigkeit determiniert ist, eine wirtschaftlich und ökologisch

optimale Beseitigung oder/und Verwertung nur bei Einhaltung bestimmter 'Qualitäts'anforderungen sichergestellt ist. Angesprochen sind hier u.a. technisch und wirtschaftlich mögliche Substitutionsprozesse bei der Güterproduktion.

Im dritten Problemkreis handelt es sich darum, daß je nach Art der Beseitigung und der Verwertung der Abfälle aus gleichen Abfallstoffen Güter und/oder Abfälle entstehen, bei Aktivitätenkomplexen (z.B. Kläranlage und Kompostierung) aus Abfällen der einen Aktivität bei der nachfolgenden ein neuer Kuppelproduktionsprozeß in Gang gesetzt wird.- Im Prinzip handelt es sich im dritten Komplex um gleiche Überlegungen mit umgekehrten Vorzeichen wie im ersten Problemkreis. Daher spielen gleichfalls Kostenprobleme, Standort- und Absatzfragen, gesetzliche Vorschriften, Gebührenordnungen, Transportprobleme etc. bei der optimalen abfallwirtschaftlichen Lösung eine hervorragende Rolle, die insbesondere bei regionalisierten Modellen bedeutend sind.

3 Anforderungen an ein Modell der 'Optimalen Abfallwirtschaft'

Es geht nicht in erster Linie darum, Abfälle dergestalt zu vernichten, daß sie unserem Gesichtskreis entrückt sind, sondern bei der Planung einer ordnungsgemäßen Abfall'beseitigung' im Rahmen einer optimalen Abfallwirtschaft ist zu untersuchen, wie aus zu Abfall deklarierten Gütern unter Beachtung hygienischer, technischer, ökologischer, sozio-ökonomischer Nebenbedingungen (fixierte Ziele) eine Optimierung der Abfallbelastung erreicht werden kann. Die Minimierung der Müllbelastung berücksichtigt die fixierten Ziele nicht und ist daher eine irrelevante Fragestellung.

Die Zielfunktion soll der Sicherung und der Verbesserung des erreichten Lebensstandards dienen. Als Ersatzparameter bietet sich trotz der berechtigten Zieldiskussion aus methodischen Gründen das Volkseinkommen als flexibles Ziel an.

Es erscheint wenig sinnvoll, in der Aufbauphase dieses Modells die verschiedenen Vorschläge zur Verbesserung des Zielkriteriums in die Aufgabenstellung einzubringen; es sei zudem nochmals darauf hingewiesen, daß nicht nur das flexible Ziel Volkseinkommen in der Optimierung berücksichtigt wird, sondern daß die Aufgabenstellung wie folgt lautet: Maximiere das Volkseinkommen unter strenger Beachtung der fixierten Ziele (Nebenbedingungen). Die Nebenbedingungen haben keinen nebensächlichen sondern bindenden Charakter.

Erst die simultane Lösung aller interdependenten Problemkreise, also Produktion und Konsumtion, Abfallbehandlungsaktivitäten, technische und hygienische Voraussetzungen, ökologische Anforderungen, sozio-ökonomische Randbedingungen, intermediäre Bereiche, kann zu optimalen Umweltbedingungen führen. Hierbei kann vorab keine Aussage darüber gemacht werden, ob einer Verbesserung der Beseitigung oder der Verwertung, einer Ausdehnung des Recycling oder einer Substitution bestimmter Produktionsprozesse = Verringerung der produktions- bzw. konsumtionsspezifischen Abfallmengen der Vorzug zu geben ist. Bei einer simultanen Lösung der so gestellten Optimierungsaufgabe ergibt sich eine sowohl-als auch-Lösung.

4 Der gesamtwirtschaftliche Teil des Modells

4.1 Die Aktivitäten

Aktivitäten des gesamtwirtschaftlichen Teils sind die Wirtschaftssektoren (X_i^* ; i = 1 bis 56), der private (C_{pr}^*) und staatliche (C_{St}^*) Konsum, die privaten und öffentlichen Investitionen (ΔK^*), die Exporte (E_A^*) und die Importe (M_A^*), die Außenhandelsbilanz ($E_A^* - M_A^*$), die Vorratsveränderungen (Lager) (ΔV_i^*), das Volkseinkommen (BIP) (Y^*) und die Bevölkerung (P^*).

4.2 Die Zielfunktion

Flexibles Ziel des Modells ist das Bruttoinlandsprodukt, das wie folgt definiert ist:

$$Y^* = C^*_{pr} + C^*_{St} + \Delta K^* + E^*_A - M^*_A + \sum_i \Delta V^*_i , \qquad (i = 1,\ldots,56)$$

wobei die rechte Seite der Gleichung die Elemente der Endnachfrage $F^*_i = f_i \cdot Y^*$ enthält.

Die Zielfunktion lautet: Maximiere das Volkseinkommen unter Beachtung gleichgewichtiger Produktions- und Konsumtionsprozesse und einer weitgehend ausgeglichenen Außenhandelsbilanz.

$$Z = Y^* - (E^*_A - M^*_A) - \sum_i \Delta V^*_i \longrightarrow \text{MAX!}$$

4.3 Die fixierten Ziele (Nebenbedingungen)

Um die Nebenbedingungen der Zielfunktion einzuhalten, werden eine Reihe von Restriktionen eingeführt.

(1) Um die bestehende Wirtschaftsverflechtung der BRD zu beschreiben, wird die Input-Output-Verflechtung der Wirtschaftssektoren in der 56-er Sektorengliederung des DIW übernommen[1].

Für den Bruttoproduktionswert (BPW) eines Sektors i ergibt sich dann:

$$X^*_i = \sum_j a_{ij} X_j + d^{pr}_i C^*_{pr} + d^{St}_i C^*_{St} + b_i \Delta K^* + e_i E^* \pm \Delta V^*$$

$$(i,j = 1,\ldots,56)$$

In Modellschreibweise sind d_{pr} und d_{St} Spaltenvektoren, deren Elemente den Anteil des privaten und öffentlichen Konsums an der sektoralen Produktion wiedergeben, b ist

1) Vgl. R.Stäglin, H. Wessels, Input-Output-Tabellen für die BRD 1966, in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung, Berlin 1971, S.215 - 220.

ein Spaltenvektor, der Koeffizienten der privaten und öffentlichen Investitionen enthält und e ein Spaltenvektor, der die Koeffizienten des Außenhandels beschreibt.

Die Koeffizienten a_{ij}, in Matrix- und Modellschreibweise A, sind die Leontief'schen Input-Output-Koeffizienten.

Schreibt man für die Bestimmungsgleichung des BPW vereinfacht: $X_i = \sum_j a_{ij} X_j + F_i$, und stellt zu $X_i - \sum_j a_{ij} X_j - F_i = 0$ um, so ergibt sich in Koeffizientenschreibweise, setzt man für die Koeffizienten Eins eine Einheitsmatrix I, folgender Ausdruck: $I - A - d_{pr} - d_{St} - b - e - I$, was der im Modell benutzten Schreibweise entspricht.

Da die Koeffizienten d_{pr}, d_{St}, b und e den Anteil angeben, mit dem der Sektor i an der Endnachfrage beteiligt ist, gilt:

$$\sum_i d_i^{pr} = \sum_i d_i^{St} = \sum_i b_i = \sum_i e_i = 1 \mathrel{\hat{=}} 100\ \%$$

Weiterhin muß die Summe aller Inputkoeffizienten a_{ij} eines Sektors j zuzüglich der Wertschöpfungsquoten w_j und der Importquoten m_j sich zu Eins ergänzen:

$$\sum_i a_{ij} + w_j + m_j = 1 \mathrel{\hat{=}} 100\ \%$$

Aus der Summe aller Wertschöpfungen der Sektoren ergibt sich das Volkseinkommen: $Y^* = \sum_j w_j X_j$ oder in Modellschreibweise:

$$w' \cdot X - 1 \cdot Y^* = 0.$$

(2) Um eine ausgeglichene Entwicklung des/der privaten und staatlichen Konsums bzw. Investitionen zu sichern, werden Verhaltensgleichungen eingeführt, die Konsum und Investitionen in Relation zum Volkseinkommen setzen.

So können die Konsumquoten τ der privaten Haushalte zwischen den Werten τ_1 und τ_2, die der öffentlichen Haushalte ν zwischen ν_1 und ν_2 die Investitionsquoten φ der Privaten und des Staates zwischen φ_1 und φ_2 schwanken.

(3) Die Arbeitskräfte L^* sind durch Beschäftigungskoeffizienten $\hat{l}_x$ mit der Produktion X linear limitational verbunden.

(4) Die Bevölkerung ergibt sich aus $g = \frac{1}{\varkappa}$ multipliziert mit den Bruttoproduktionswerten X der Sektoren, da Erwerbstätige: Bevölkerung = $L^* : P^* = \varkappa \hat{=}$ Erwerbsquote; weil $\hat{l}_x \cdot X = L^*$, ist
$P^* = \frac{\hat{l}_x X}{\varkappa} = g' X$. Auch hier herrschen linear limitationale Verhältnisse.

(5) Um ein Mindesteinkommen pro Kopf der Bevölkerung zu erreichen, wird die Restriktion $Y^*_{min} \geq \bar{\omega} P^*$ gesetzt.

(6) Durch die Gleichung M^*_A werden die Importe aus dem Ausland bestimmt.

Dabei bedeutet der Zeilenvektor m'_X die Importkoeffizienten der Sektoren. Die Anteile m_{pr}, m_K und m_E sind die Importkoeffizienten der privaten Haushalte, der privaten und öffentlichen Investitionen und der Anteil der Importe an den Exporten.

Die Zeile M^*_A ergibt folgende Gleichung:

$$- m'_X X - m_{pr} C^*_{pr} - m_K \Delta K^* + (1 - m_E) E^*_A = (E^*_A - M^*_A)$$

(7) Durch die $\gtrless$ Bestimmung der Gleichung $E^*_A - M^*_A$ wird ausgesagt, daß eine positive Außenhandelsbilanz bestehen soll.

Es gilt $(E_A^* - M_A^*) \geq 0$, wobei die Außenhandelsquote Ψ zwischen Ψ_1 und Ψ_2 schwanken kann und die Höhe des Außenhandelsüberschusses wegen $E_A^* - M_A^* \gtrless \Psi \cdot Y^*$ vom Bruttoinlandsprodukt und damit von der Produktion abhängig ist.

5 Darstellung des Abfallmodells (Müll und Klärschlamm)[1)]

Das Submodell 'Abfall' knüpft an den ökonomischen Teil des Gesamtmodells an. Es wird davon ausgegangen, daß zwischen Güterproduktion und -konsumtion und der Abfallentstehung konstante Proportionen bestehen.

Da es sich bei diesen Stoffen um Abfälle unterschiedlicher Menge und Zusammensetzung handelt, werden Abfallstoffgruppen gebildet, die chemische, physikalische, biologische, technische und ökologische Gesichtspunkte berücksichtigen. Durch eine entsprechende Verschlüsselung wird sichergestellt, daß bei der großen Anzahl der anfallenden Abfallstoffe eine ordnungsgemäße und kontrollierbare Beseitigung oder Verwertung vorgenommen bzw. geplant werden kann.

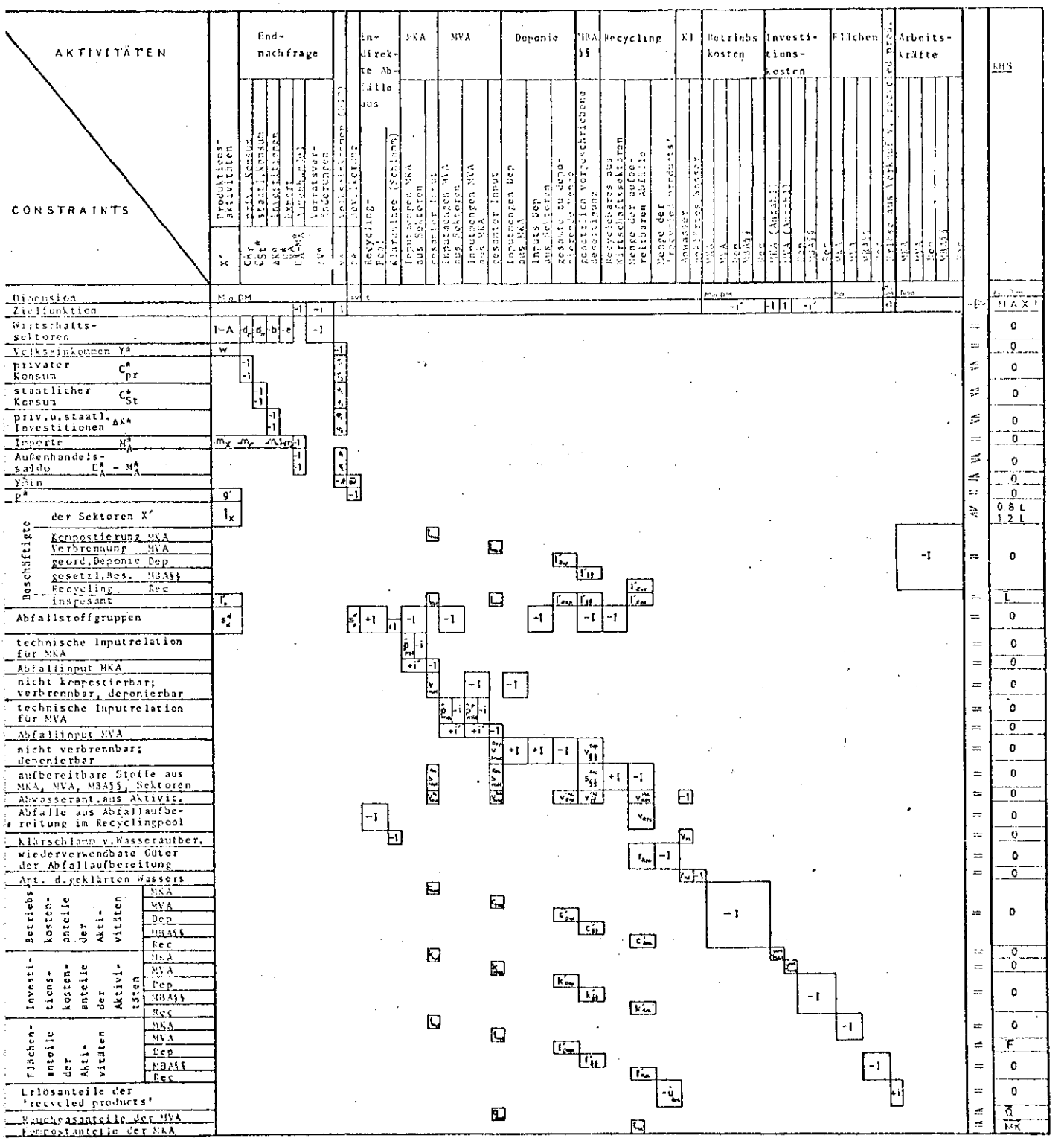
Das Modell besteht aus einem 'Studien'-modell und einem erweiterten Modell, das statistisch und verfahrensmäßig abschnittsweise auf den letzten Stand des Studienmodells gebracht wird.

Im Studienmodell wird mit zehn Abfallstoffgruppen experimentiert, was für ein realistisches Modell einen zu hohen Aggregationsgrad bedeutet, insbesondere dann, wenn die diversen Recyclingprozesse mitbetrachtet werden. Andererseits hat die geringe Stoffgruppenanzahl den Vorteil, ohne großen Rechenaufwand das Modell an sich und seine Voraussetzungen testen zu können.

---

1) Vgl. hierzu P. Brasse, Der Beitrag der Abfallwirtschaft zur Verbesserung des Umweltschutzes; Beiträge zum Siedlungs- und Wohnungswesen und zur Raumplanung (Beiträge SWR), Band 9, Münster 1973.

Schaubild 1: MATRIX DES ABFALLMODELLS (einregional)



Dieses Verfahren kann allerdings nur so lange beibehalten werden, wie sich das Modell im Experimentierzustand befindet, da anschließend die Hauptaufgabe darin besteht, das erweiterte Modell statistisch und verfahrensmäßig aufzufüllen und zu verfeinern.

Die oben angesprochenen konstanten Proportionen werden durch Koeffizienten der Benennung Tonnen Abfallstoff pro Bruttoproduktionswert in DM des jeweiligen Sektors und in Tonnen Abfallstoff pro Kopf der Bevölkerung ausgedrückt. Die Koeffizienten, die die Abfallmengen der Sektoren bestimmen, sind im Schaubild 1 s_x^d und haben die Dimension $[\frac{t}{DM}]$ und die, welche die Abfallmengen der Bevölkerung bestimmen s_p^d die Dimension $[\frac{t}{p}]$. Durch Multiplikation der Bruttoproduktionswerte [DM] mit den Koeffizienten s_x^d, $[\frac{t}{DM}]$ ergibt sich aus $DM \cdot \frac{t}{DM} = t$ die Menge der jeweils entstehenden Abfallstoffe der Sektoren in Tonnen, bzw. aus $s_p^d \cdot P$ die Menge der jeweils entstehenden häuslichen Abfallstoffe in Tonnen.

Diese derart festgestellten Abfallstoffmengen, gegliedert in Stoffgruppen, stellen die direkten Inputmengen der Abfallbeseitigungs- und verwertungsaktivitäten dar.

Die Inputmengen für die einzelnen Aktivitäten werden nach verschiedenen Gesichtspunkten bestimmt. Unterschieden wird zwischen den Stoffgruppen, für die es keine alternativen Aktivitäten gibt und solchen, die durch zwei oder mehr Aktivitäten beseitigt oder verwertet werden können.

Zur ersten Gruppe gehören:

(1) Alle Stoffgruppenmengen, für die eine bestimmte gesetzliche Beseitigung oder Verwertung vorgeschrieben ist. Diese gehen an die Aktivität 'gesetzliche Abfallbeseitigungsanlagen' (MBA§§).

(2) Alle Stoffgruppenmengen, die nur verbrannt bzw. nur deponiert werden können. Die ersten gehen an die Aktivität Verbrennung (MVA) und die zweiten an die Aktivität 'geordnete Deponie' (Dep).

Diese vorbestimmten Beseitigungen und Verwertungen werden im Modell dadurch erreicht, daß Null-Eins-Matrizen eingeführt werden, d.h. die Aktivitäten, die von einer bestimmten Stoffgruppe keine Inputs erhalten sollen, haben in der entsprechenden Zeile keine Eintragung, diejenigen, die den Input erhalten sollen, erhalten eine Eins zugewiesen.

Beispiel:

Stoffgruppe	MKA	MVA	Dep	MBA§§	Rec	
Tierkörper	0	0	0	1	0	
Abraum	0	0	1	0	0	
Altpapier	1	1	1	0	1	
Hausmüll	1	1	1	0	0	
Schrott	0	0	0	0	1	
Proport.MKA	1|2					
Proport.MVA		1|3				

Weiterhin werden alle Stoffgruppenmengen, die direkt oder nach Aufbereitung wiederverwendbar sind, in den Recycling-Pool (Rec) geleitet (wie im Beispiel bei Schrott).

Die zweite Gruppe, in der es alternative Beseitigungs- und Verwertungsaktivitäten für bestimmte Stoffgruppen gibt, erhalten in der gleichen Zeile mehrere Eintragungen, d.h. diese Aktivitäten konkurrieren miteinander um die gleiche Stoffgruppe bei limitierter Abfallmenge. Im Beispiel handelt es sich dabei um die Gruppen Altpapier und Hausmüll.

Da in den Aktivitäten Müllkompostierung (MKA) und Müllverbrennung (MVA) technische Inputrelationen bestehen, gilt es die Einsatzmengen verschiedener Stoffgruppen zueinander in Relation zu setzen. Dies geschieht dadurch, daß durch $\hat{p}_{MKA}$ und $\hat{p}_{MVA}$ vorgeschrieben wird, wieviele Anteile einer bestimmten Stoffgruppe als Input in die Anlage gehen dürfen, wenn von einer anderen ein Anteil eingeht. Im Beispiel wird dies bei Altpapier und Hausmüll gezeigt. Wenn bei der MKA ein Anteil Altpapier eingeht, müssen zwei

Anteile Hausmüll hinzukommen; wenn Hausmüll nicht in ausreichender Menge vorhanden ist, muß die Inputmenge des Altpapiers in der vorgeschriebenen Relation sinken.

Eines der wesentlichen Ziele einer optimalen Abfallwirtschaft ist die restlose Beseitigung und Verwertung aller zu Abfall deklarierten Stoffe.- Für die direkt anfallenden Abfallstoffmengen ist diese Forderung erfüllt, nicht aber für die Kuppelprodukte der Aktivitäten. Es gilt daher:

Die Verknüpfung der Aktivitäten MKA, MVA, Dep, MBA§§, Rec und Kläranlage (Kl) ermöglicht eine vollständige integrierte Abfallbeseitigung und Verwertung.

Der Output der MKA-Aktivität besteht aus Stoffen, die nicht kompostiert werden können, Schrott und sonstige nicht verrottbare Bestandteile sowie Kompost. Für die nicht verrottbaren Bestandteile wird eine alternative Beseitigung und Verwertung durch die Aktivitäten MVA und Dep vorgenommen (v_{MKA}). Die verwertbaren Güter Schrott und Kompost gehen in den Recycling-Pool ein (s^{Rec}_{MKA}). Die anfallenden Abwässer gehen an die Aktivität Kläranlage (v^{Kl}_{MKA}).

Die nicht verrottbaren Bestandteile, die aus dem alternativen Prozeß in die MVA gehen, werden wie oben bei der technischen Inputrelation berücksichtigt ($\hat{p}^{p}_{MVA}$).

Output der MVA ist Nicht-Verbrennbares, was zur geordneten Deponie (v^{Dep}_{MVA}), zur Kläranlage (v^{Kl}_{MVA}) und zum Recycling-Pool gelangen muß; gleichfalls werden die wiederverwendbaren Produkte wie Wärme, Elektroenergie und ggf. Schlacke an die Rec-Aktivität gebucht (s^{Rec}_{MVA}).

An die geordnete Deponie gelangen nunmehr die nicht kompostierbaren Bestandteile, die von der Alternative Verbrennung nicht verwertet und beseitigt werden konnten, die aus der gesetzlichen Abfallbeseitigung zur Deponie gelangenden Ablagerungsstoffe ($v^{Dep}_{§§}$) und die Bestandteile aus der MVA-Aktivität, die deponiert werden müssen.

Outputs der geordneten Deponie sind Abfallsickerwässer, die gesammelt werden müssen und der Kläraktivität zugeführt werden (v_{Dep}^{Kl}).

Outputs der gesetzlichen Abfallbeseitigung sind wie erwähnt die zu deponierenden Stoffe, Abwässer ($v_{\S\S}^{Kl}$), und wiederverwendbare bzw. aufbereitbare Produkte (z.B. Altöl) ($s_{\S\S}^{Rec}$).

Inputs des Recycling-Pools sind die direkten Inputs der Sektoren und die indirekten aus MKA, MVA, MBA§§.

Outputs der Rec-Aktivitäten sind Abwässer (v_{Rec}^{Kl}), Abfälle aus der Aufbereitung (v_{Rec}) und die recyclebaren Güter ($\hat{r}_{Rec}$).

Da die Abfälle aus der Aufbereitung unterschiedlicher Qualität und Quantität sind und sie mit Abfallstoffen der Sektoren übereinstimmen, werden diese indirekten Abfälle wie direkte behandelt, d.h. sie werden insgesamt dem beschriebenen Konkurrenz- und Bestimmungssystem unterworfen.

Die Inputs der Kläranlage sind Abwässer aus MKA, MVA, Dep, MBA§§, Rec. Nach Klärung der Abwässer, die nicht genauer beschrieben werden, da sie später in das Submodell Abwasser eingehen, erhält man gereinigtes Wasser und Klärschlamm, wobei der Klärschlamm wie die Abfallstoffe des Recycling-Pools wie direkte Inputs behandelt werden.

Da es bei der Beschreibung um eine restlose und einwandfreie Abfallbeseitigung geht, sind die 'rechten Seiten' der linearen Gleichungen (Zeilen) Null zu setzen. Hierdurch wird vorgeschrieben, daß alle Abfallstoffe in den Aktivitäten verarbeitet werden müssen.- So ergibt sich z.B. in der Zeile Abwasser: Die Teilsummen aller an die Kläranlage gehenden Abwässer müssen gleich der Gesamtsumme der in der Kläranlage zu verarbeitenden Abwässer sein.

Da bei den konkurrierenden Aktivitäten die Inputrelationen festgesetzt sind, können nach Formulierung einer optimalen technischen und kostenmäßigen Kapazitätsstufe über Betriebskostenkoeffizienten mit der Dimension [DM/t] und Investitionskoeffizienten gleicher Dimension die Betriebs- und Investitionskosten bestimmt werden.- Gleiches gilt für die notwendigen Flächenanteile der Aktivitäten, die über die Flächenkoeffizienten der Dimension [m^2/t] in das Modell eingeführt werden.- Da bei der Müllverbrennungsanlage nach Feststellung der in die Aktivität eingehenden Abfallkomponenten die Qualität und Quantität der entstehenden Rauchgase bekannt ist, lassen sich über Rauchgaskoeffizienten die Mengen und Zusammensetzungen bestimmen. Diese gehen später in das Submodell 'Abgase' ein.

Weiterhin sind die Erlösanteile, d.h. die Preise der recycled products pro Tonne einzusetzen, um die Erlöse aus dem Verkauf dieser Güter zu ermitteln.

Bis zu diesem Abschnitt enthält das Modell noch keine Kriterien, nach denen die Abfälle auf die verschiedenen Aktivitäten verteilt werden sollen, außer in den Fällen, in denen die Beseitigungsmethode vorgeschrieben ist. Es ist daher der angedeutete 'Konkurrenzprozeß' zu beschreiben. Zu dessen Steuerung müssen Randbedingungen formuliert werden, die den weiter oben beschriebenen Nebenbedingungen bzw. fixierten Zielen entsprechen.

Je nach Zielsetzung der Planungsträger und der Politiker können nun die verschiedenen Zielsetzungen quantifiziert werden. Werden z.B. die Investitionskosten der Aktivitäten limitiert, so wird bei der Lösung insbesondere das Verfahren präferiert werden, das die geringsten Investitionskosten pro zu beseitigender Tonne Abfall hat. Dieses Ergebnis kann aber u.U. nicht wünschenswert sein, weil das investitionskosten-günstige Verfahren ausgesprochen flächenintensiv sein kann. In diesem Fall ist die Gesamtfläche für die Aktivität zu limitieren. Für die simul-

tane Lösung des Problems bedeutet dies, daß nach Ausschöpfung der vorgegebenen Flächen für eine Aktivität eine konkurrierende mit höheren Investitionskosten die anfallenden Abfälle aufnehmen muß.

Im Modell werden für verschiedene Aktivitäten Randbedingungen für Betriebskosten, Investitionskosten, Flächen, Erlöse und Emissionen formuliert. Dadurch, daß die Kosten und Erlöse der Aktivitäten in die Zielfunktion eingehen, wird sichergestellt, daß das gesamtwirtschaftliche flexible Ziel 'Maximierung des Volkseinkommens' berücksichtigt wird - d.h. die Kosten der Aktivitäten werden minimiert und die Erlöse maximiert; immer unter Einhaltung der fixierten Ziele.- Dieses Verfahren hat den einen Nachteil, daß eine Interpretation des ausgewiesenen Zielwertes erschwert wird.-

Beispiel: Für die Hausmüllbeseitigung und Verwertung werden bei den alternativen Verfahren Kompostierung, Verbrennung und geordnete Deponie Randbedingungen für Kosten, Flächen und Rauchgase formuliert. Über die Kostenminimierungsvorschrift der Zielfunktion wird der Deponie eine so große Menge an Hausmüll zugegeben, bis deren Flächenkapazität erschöpft ist. Unter der Annahme, die Kompostierung sei das nächstgünstigste Verfahren, wird der verbleibende Hausmüll so lange an die Kompostierung geliefert, bis deren Budget erschöpft ist. Die Erlöse seien hier vernachlässigt. Ist das finanzielle Budget der Kompostierung erschöpft, so werden die verbleibenden Hausmüllmengen an die Verbrennung geliefert.-

Bei dieser Vorgehensweise können zwei unlösbare Situationen entstehen.

1. Falls die Menge der Rauchgase aus der Verbrennung die Norm bereits dann erreicht, wenn der gesamte Hausmüll noch nicht beseitigt ist.- In diesem Fall ist dem Planungsträger oder Politiker mitzuteilen, daß mit dem zur Verfügung stehenden Budget für die Kompostierung, mit den ausgewiesenen Flächen für die Deponie oder mit den Emissionsstan-

dards eine ordnungsgemäße Hausmüllbeseitigung nicht vorgenommen werden kann. Durch eine Änderung der Randbedingungen also der fixierten Ziele, muß dann, um das fixierte Ziel der vollständigen Beseitigung und Verwertung nicht zu gefährden, eine lösbare Situation geschaffen werden.

2. Eine unlösbare Situation kann auch dann entstehen, wenn wegen der verfahrensbedingten technischen Inputkoeffizienten bei den Aktivitäten MKA und MVA soviele Abfälle abgewiesen werden, daß Flächenrestriktionen bei der geordneten Deponie eine vollständige Beseitigung nicht erlauben.- In diesem Fall wäre eine Flächenumwidmung im Rahmen des Submodells 'Flächen' oder eine Erhöhung des technischen Wirkungsgrades der Aktivitäten notwendig.

Eine weitere Maßnahme zur Lösung der beiden Fälle wäre, den Konsum bestimmter Güter derart einzuschränken, daß entsprechend weniger Hausmüll anfällt. In diesem Fall werden wegen der konstanten Relationen zwischen Endnachfrage und Produktion bestimmte Güter weniger produziert. Da die Arbeitskräfte im wirtschaftlichen Teil des Modells linear limitational mit der bestehenden Produktionsstruktur (Vorleistungsverflechtung) verbunden sind, werden sich die Auswirkungen der Einschränkung des Konsums in einer Verringerung der Beschäftigung in den betroffenen Sektoren nachweisen lassen.- In diesem Fall konkurrieren die Ziele verbesserter Umweltschutz und Erhaltung der Beschäftigung miteinander.

Während bei einem Beispiel, wie dem des Hausmülls, die Auswirkungen noch qualifiziert werden können - eine Quantifizierung würde auch hier bereits auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen -, kann die gesamte komplexe Optimierungsaufgabe nur noch mit Großrechenanlagen bewältigt werden.- Der <u>Vorteil</u> des hier dargestellten Submodells liegt daher insbesondere in der <u>simultanen Lösung des gesamten Abfallproblems</u>.

Im derzeitigen Stadium der Erprobung des Modells wird jeweils mit einem kleinen Restriktionsbündel gearbeitet.

Gleichfalls werden immer nur einzelne Restriktionen erweitert oder verengt. Hierdurch können die Auswirkungen jeder einzelnen Änderung eines der fixierten Ziele qualifiziert und quantifiziert werden.

Dieses Verfahren eignet sich insbesondere zur Auffindung von realistischen Normen, weil die Auswirkungen auf konkurrierende Ziele der Wirtschafts- und Sozialpolitik explizit gekennzeichnet werden können.

Aus dem beigefügten Schaubild 1, das den derzeitigen Aufbau des Modells und den Erkenntnisstand der Arbeit kennzeichnet, wird ersichtlich, welche Größen berechnet werden und mit welchen Restriktionen momentan gearbeitet wird.

Berechnet werden folgende Größen:

1. Die Kompostmenge
2. Die Menge an Heizwärme und Elektroenergie der MVA
3. Die auf der geordneten Deponie abzulagernden Abfallstoffmengen
4. Die Menge der in die gesetzliche Abfallbeseitigung eingehenden Abfallstoffe
5. Die Menge der 'recycled products'
6. Die Menge des geklärten Wassers
7. Die Rauchgasmengen der MVA
8. Die Betriebs- und Investitionskosten der Aktivitäten
9. Die Erlöse aus dem Verkauf der 'recycled products'
10. Die Flächenbeanspruchung durch die Aktivitäten
11. Die Anzahl der benötigten optimalen Aktivitäteneinheiten
12. Die Anzahl der in den Aktivitäten Beschäftigten.

Die Restriktionen der 'Rechten Seite' (right-hand-side = RHS) beim ersten Lauf sind:

1. Der Bedarf an Müllkompost
2. Die zulässige Menge an Rauchgasen aus Müllverbrennungsanlagen

3. Die zulässigen Flächenanteile für geordnete Deponien
4. Die vollständige Beseitigung und Verwertung aller anfallenden direkten und indirekten Abfallstoffe

Die Investitionskosten werden bei den technisch entwickelten Verfahren Müllkompostierung und Müllverbrennung nach einem besonderen Verfahren berechnet. Es werden für diese Aktivitäten die Investitionskosten für jeweils eine optimale technische und kostenminimale Anlage vorgegeben. Daraus ergibt sich in der ersten errechneten Lösung des Gesamtproblems die Anzahl der benötigten optimalen Anlagen.

Da in der ersten Lösung (erster Lauf) höchstens zufällig eine ganzzahlige Menge an optimalen Anlagen ausgewiesen wird, entsteht ein Interpretationsproblem.

Eine Interpretationsmöglichkeit ist, den Teil der Anlagen, der über die letzte ganzzahlige Einheit hinausgeht, als suboptimal zu erklären.- Dieses Verfahren hat den Nachteil, daß wegen der für die suboptimale Einheit veränderten Kostenindizes eine Änderung der Gesamtlösung auftritt. Bei einer Weiterverfolgung dieses Weges wäre voraussichtlich eine hohe Anzahl von Neuberechnungen notwendig, ehe wiederum eine optimale Lösung erreicht würde.

Daher wird ein anderer Weg beschritten.- Nach der ersten nicht ganzzahligen Lösung wird die RHS dahingehend geändert, daß die Zahl der Aktivitäten MKA und MVA auf die Zahl der ganzzahligen optimalen Anlagen limitiert wird. Gleichzeitig wird die Flächenrestriktion für die geordnete Deponie aufgehoben. In einem weiteren Lauf ergibt sich dann die tatsächlich benötigte Deponiefläche bei einer optimalen Lösung des gesamten Abfallproblems.

Dadurch, daß die abzulagernden Reststoffe aus den Aktivitäten MVA und MKA explizit ausgewiesen werden, ergibt sich die Fläche der benötigten Reststoffdeponie simultan.

Die Berechnung von optimalen Kapazitätseinheiten ist ein erster Schritt hinsichtlich der zu erfolgenden Regionalisierung, die Standort- und Transportmodelle beinhalten soll.

6 Weiterentwicklung des Abfallmodells für eine Region

Bei der Weiterentwicklung des beschriebenen Modells werden sich insbesondere bei den neuen Aktivitäten 'gesetzliche Abfallbeseitigung' und dem 'Recycling-Pool' Verfeinerungen anbieten.

Es gilt daher nicht nur für die Abfallentstehungskoeffizienten eine umfassende Bestandsaufnahme vorzunehmen, sondern gleichfalls müssen die Produktionsprozesse der nicht klassischen Aktivitäten detaillierter erfaßt werden.

Da offenbar nach dem Abfallbeseitigungsgesetz des Bundes die Definition des Begriffs Abfall auf den engen Bereich der direkten Abfälle bezogen ist, gilt es, die Bedeutung der Kuppelprodukte der Beseitigungs- und Verwertungsaktivitäten stärker in den Vordergrund zu stellen; insbesondere deshalb, weil mit statistischen Erhebungen in diesem Bereich der Abfallentstehung nach geltendem Recht nicht zu rechnen ist. Bislang ist es daher nicht möglich, Restriktionen für die Kuppelprodukte der nicht klassischen Aktivitäten zu formulieren.

Gleichfalls wird nach dem Abfallbeseitigungsgesetz nicht damit zu rechnen sein, daß der Verwertung - also dem Recycling - von Abfällen statistische Aufmerksamkeit gewidmet wird. Einer der Schwerpunkte kommender Aufgabenstellungen ist daher, diesen Bereich zu erfassen und somit ein Abfallmanagement hinsichtlich einer Ressourcenplanung in das Modell aufzunehmen.

Hierbei werden insbesondere Substitutionsprozesse zu untersuchen und deren Auswirkungen auf die Vorleistungsverflechtung, die Beschäftigtenstruktur und das Volkseinkommen nachzuweisen sein.

Nicht zuletzt aus Gründen des Abfallmanagements ist eine Dynamisierung des Modells erforderlich.- Da sich bereits jetzt nachweisen läßt, daß bei konstanten direkten Abfallinputmengen die Menge der indirekten Abfallstoffe überproportional steigt, d.h. der Output der Aktivitäten ist bei konstanten Inputs nicht konstant, kann über ein dynamisiertes Modell eine Qualifizierung und Quantifizierung der ansteigenden Abfallbelastung der Umwelt vorgenommen werden.

Nach Abschluß der vorstehenden Untersuchungsabschnitte im einregionalen Bereich soll eine Regionalisierung des Modells vorgenommen werden.

7 Regionalisierung des Modells

Es wird aus Gründen des Rechenaufwandes und der Komplexität der Aufgabenstellung vorerst nicht möglich sein, das vorstehende BRD-Modell regionalisiert für die gesamte BRD zu erstellen.

Damit wird eine Abgrenzung der zu regionalisierenden Gesamtregion notwendig.

Geplant ist, aus der Gesamtregion BRD ein geschlossenes Wirtschaftsgebiet herauszugreifen und dieses in mindestens drei Untersuchungsregionen aufzuteilen. Es ergäben sich auf diese Weise vier oder mehr Regionen, mindestens drei des Untersuchungsgebietes und zusätzlich der Rest der BRD als weitere 'Region'.

Da es sich bei den drei zu untersuchenden Regionen um 'Abfallregionen' handelt und in ein solches Modell Standort- und Transportüberlegungen eingehen müssen, sind die Grenzen der Abfallregionen Bestandteil der Untersuchung. D.h. eine optimale Abfallregion beinhaltet drei Optimierungskomponenten:

1. Kosten- und kapazitätsoptimale Aktivitäten
2. optimale Standorte
3. minimale Sammel- und Transportkosten.

Können innerhalb des vorgesehenen Untersuchungsgebietes keine drei optimalen Abfallregionen gefunden werden, so ist die Untersuchung auf anschließende Gebiete auszudehnen.

Da gerade wegen der optimalen Standorte der geordneten Deponie scharfe ökologische Anforderungen gestellt werden müssen, werden die Wahlmöglichkeiten stark begrenzt sein.

Das hinzuzufügende Transportmodell wird verschiedene Teilbereiche haben. So muß zwischen Sammel- und Transportstrecken der direkten Abfallentsorgung und den Transportwegen der indirekten sowie den Absatzwegen für die recycled-products unterschieden werden, da nicht angenommen werden kann, daß die optimalen Standorte der verschiedenen zu einer vollständigen und ordnungsgemäßen Abfallbeseitigung und -Verwertung notwendigen Aktivitäten identisch sind.

Ein weiteres zu berücksichtigendes Problem stellen die bereits bestehenden Kapazitäten aller Aktivitäten dar, bzw. bei den Deponien die bereits abgelagerten Abfallstoffmengen. Es wird hier zu untersuchen sein, inwieweit ein Abbau oder eine Ausweitung dieser Kapazitäten notwendig ist, um möglichst nahe an eine optimale Lösung ohne Vorgabe bestehender Kapazitäten heranzukommen.- Hierbei wird besonders auf die Schattenpreise (d.s. Opportunitätskosten) der zu treffenden Maßnahmen zu achten sein.

Aus einem regionalisierten Modell werden interessante Aufschlüsse darüber erwartet, welche Produkte wo produziert und wo zu Abfall werden.- Außerdem wird erwartet, daß unausgenutzte Recycling-Möglichkeiten aufgezeigt werden, bzw. das Ausweisen von Schattenpreisen einer Recycling-Einführung der Planung von Abfallverwertungskomplexen in ähnlicher Weise wie bei Industriekomplexen zugute kommen wird.

- Eine anschließende Dynamisierung des regionalisierten Modells soll wiederum Auswirkungen der Prozeßsubstitution und der sich daraus ergebenden veränderten Umweltsituation im Zeitablauf konkretisieren. Zudem werden hierdurch Änderungen der Faktorallokation, der Abfallregionen, der Transportwege und der optimalen Beseitigungs- und Verwertungsaktivitäten erfaßt.- Gleichfalls läßt sich eine Prognose der Abfallentwicklung durchführen, die simultan maßnahmen-spezifisch orientiert ist.

Verzeichnis der Symbole

Gesamtwirtschaftlicher Teil

Symbol	Erklärung
DM	Deutsche Mark
Mio	Million
t	Tonnen
ha	Hektar
*	Gesamtwirtschaft Bundesrepublik Deutschland
X_i	Bruttoproduktion der Wirtschaftsektoren ; i = 1 bis 56
X'	dgl.; Zeilenvektor der Elemente der Bruttoproduktion
C_{pr}	Privater Konsum
C_{St}	Staatlicher Konsum
ΔK	Private und öffentliche Investitionen
E_A	Export
M_A	Import
ΔV_i	Vorratsveränderungen, Lager
F_i	Endnachfrage
Y	Bruttoinlandsprodukt, Volkseinkommen
Y_{min}	Mindesteinkommen der Volkswirtschaft
ΣX_j	Bruttoproduktionswert
P	Bevölkerung
L	Erwerbstätige
Z	Zielfunktion
I	Einheitsmatrix; Diagonalmatrix, deren Elemente Werte von Eins sind
i	Spaltenvektor, dessen " " " " "
i'	Zeilenvektor, " " " " " "
a_{ij}	Input-Output-Koeffizienten der Vorleistungsverflechtung
A	Matrix der Input-Output-Koeffizienten
d_{pr}	Spaltenvektor der Anteile des privaten Konsums an der sekt. Prod
d_{St}	" " " " staatlichen " " " " "
b	" " " der " und " Investitionen " " " "
e	" " " des Außenhandels " " " "
f_i	Anteil der Endnachfrage am Y ; $f_i = F_i / Y$
w_j	Wertschöpfungsquote der Sektoren
w'	Zeilenvektor der Wertschöpfungsquoten
m'_x	" der Importkoeffizienten der Sektoren
m_{pr}	Importkoeffizienten der privaten Haushalte
m_K	" " " und öffentlichen Investoren
m_E	" des Transithandels
τ	Konsumquote der privaten Haushalte
ν	" " öffentlichen "
φ	Investitionsquote der privaten und öffentlichen Investoren
ϕ	Außenhandelsquote
$\bar{\omega}$	Mindesteinkommen pro Kopf der Bevölkerung
$\hat{I}_x$	Diagonalmatrix der sektoralen Beschäftigungsquoten
$\varkappa$	Erwerbsquote; L / P
g'	Zeilenvektor der Elemente, die Höhe der Produktion und Bevölkerungsanzahl verbinden

Fortsetzung: Verzeichnis der Symbole

Abfallwirtschaftlicher Teil

Symbol	Erklärung
l_{MKA}	Beschäftigungskoeffizienten der Abfallkompostierungsanlagen
l_{MVA}	" " Abfallverbrennungsanlagen
l'_{Dep}	Zeilenvektor der Beschäft.-koeff. der geordneten Deponie
$l'_{\S\S}$	" " " " gesetzlicher Abfallbehandlungsanlagen
l'_{Rec}	" " " " des Recycling-Pools
MKA	Abfallkompostierungsanlagen
MVA	Abfallverbrennungsanlagen
Dep	geordnete Deponien
MBA§§	Behandlungsanlagen für Abfälle, deren Beseitigung gesetzlich bestimmt ist
Rec	Recycling-Pool
Kl	Kläranlage
$s^d_{x\ ,\ p}$	Koeff. d. direkten Anfalls v. zu beseitigenden u. aufzubereitenden Abfäl
p	Koeff., welche die technischen Inputrelationen in d. Aktivitäten bestimme
$\hat{p}$	Diagonalmatrix mit den Elementen p
v	Koeff. des Abfalloutputs (indirekte Abfälle) der Aktivitäten
v'	Zeilenvektor mit den Elementen v
$\hat{v}$	Diagonalmatrix mit den Elementen v
s^{Rec}	Koeff. des Outputs an wiederverwendbaren Gütern aus den Aktivitäten
$r_{Rec,\ Kl}$	Koeff., die den Anteil der recycled products der Aktivit. Rec u. Kl best
Der Index unten zeigt die Herkunft, der oben die Bestimmung an	
c	Betriebskostenindizes der Aktivitäten
c'	Zeilenvektor mit den Elementen c
k	Investitionskostenindizes der Aktivitäten
k'	Zeilenvektor mit den Elementen k
f	Flächenindizes der Aktivitäten
f'	Zeilenvektor mit den Elementen f
$\hat{q}_{Rec}$	Diagonalmatrix, deren Elemente die Preise pro Tonne recycled products si
q_{MVA}	Rauchgaskoeffizient der MVA
J^{opt}	optimale Investitionseinheit einer Aktivität
RHS	right-hand-side
$\overline{F}$	Fläche, konstant
$\overline{Q}_{MVA}$	Rauchgasoutput der MVA, konstant
$\overline{MK}$	Output Müllkompost, konstant
n	Anzahl, alle natürlichen Zahlen

Kjell Wiik

Ein multiregionales Entscheidungsmodell zur Optimierung der Abwasserbelastung

1 Die Funktionen des Wassers

Grob untergliedert kann man dem Wasser der Flüsse und Seen eine fünffache Funktion zukommen lassen[1]:

(1) Die des Rohstoffreservoirs für die Trink- und Brauchwassergewinnung, einschließlich der landwirtschaftlichen und fischereiwirtschaftlichen Nutzung,

(2) die des Abfalltransports,

(3) die der Selbstreinigung (die sogen. terminale Reinigungsstufe),

(4) die der Wasserstraße,

(5) die der Erholung.

Zu beachten ist, daß die extensive Nutzung einer Funktion die Nutzung anderer Funktionen einengen oder sogar ausschließen kann.

So stört z.B. eine übermäßige Abfallstoffbelastung die Selbstreinigung wie die Möglichkeit der Erholung und der Trink- und Brauchwassergewinnung empfindlich. Andererseits engen extreme Anforderungen an die Wasserqualität die Möglichkeit des Abfalltransports und die volle Nutzung der Funktion der terminalen Reinigungsstufe ein.

Die verschiedenen Nutzungen sind somit nur unter Einstellung eines gewissen Gleichgewichtes miteinander zu vereinbaren.

Zur Erstellung optimaler wasserwirtschaftlicher Pläne müssen deshalb unter Beachtung der Ansprüche an das Wasser und der Reproduktionsmöglichkeiten beim Wasser folgende Tatbestände berücksichtigt werden:

1) Vgl. R.H.Shubert und E. Deutsch, Zur Optimierung der Wasserqualität in Fließgewässern, "Gesundheits-Ingenieur", München, 92.Jg. (1971), Heft 9, S.266.

(1) Die Prozesse der Wasserbedarfsentwicklung und der Wassernutzung der Industrie und der Bevölkerung,

(2) die Naturprozesse innerhalb der Wasserressourcen,

(3) die Auswirkungen von Maßnahmen der Wasserwirtschaft und der Wassernutzung auf beide genannten Prozesse.

Ohne weitere Untergliederung dieser drei Aspekte wird sofort klar, daß ein interdependentes System von Beziehungen in solch einer Größenordnung vorliegt, daß es nur mit Hilfe von komplexen quantitativ formulierten Modellen analysiert, gesteuert und geregelt werden kann.

2 Grundüberlegungen zur Gestaltung des Abwassermodells

Das Submodell "Abwasser" stellt den Versuch dar, einen Teilaspekt der Wasserplanung, nämlich die Steuerung und Erhaltung der Qualität der Fließgewässer, mit Hilfe des Verfahrens der linearen Programmierung zu behandeln.

Die Systemteile Wasserangebot und Wassernachfrage, das Grundwasser und die stehenden Gewässer werden in dem Abwassermodell vorerst als exogene Größen behandelt. Diese Aspekte sollen in dem Frischwassermodell (Submodell 4) ausführlich untersucht werden.

Beim Abwassermodell stellt vielmehr der Einfluß von Abwässern auf die Wasserqualität eines Fließgewässers das Untersuchungsobjekt dar.

Dabei können wird nach Angaben des Ursprungs zwischen häuslichem Abwasser und industriellen Abwässern unterscheiden. Während das häusliche Abwasser überwiegend organische Inhaltsstoffe hat und in der Erfassung leicht zu handhaben ist, stellen die im Wasser gelösten und vom Wasser getragenen Abgänge der industriellen Produktion

ein größeres Problem dar. Die Zusammensetzung dieser Abwässer bezüglich ihrer Inhaltsstoffe hängt eng mit den Produktionsverfahren und der Art der produzierten Güter zusammen und ist sowohl in der anfallenden Menge als auch in der Zusammensetzung für jedes Gewerbe unterschiedlich.

Die Erfassung der vollen Auswirkung der industriellen Gewässerverunreinigung setzt demnach eine weitestmögliche Untergliederung nach Sektoren und Nutzungsarten voraus. Hierauf ist später näher einzugehen.

Weitere Überlegungen bezüglich der Modellgestaltung können folgendermaßen kurz formuliert werden:

(1) Ein geschlossenes Flußeinzugsgebiet bildet den Untersuchungsraum.

(2) Mit den Wasserressourcen (hier qualitätsmäßig zu verstehen) soll ein Maximum an gesellschaftlicher Produktion gesichert werden.

(3) Die ökologischen und volkswirtschaftlichen Belastungen, die sich aus der Beschaffenheit des Flußwassers ergeben, sollen auf einem erträglichen Niveau gehalten werden.

(4) Die erwünschte Wasserqualität ist mit einem Minimum an Aufwand zu erreichen.

Es ist leicht zu sehen, daß die Punkte 2, 3 und 4 zum Teil konkurrierende Zielvorstellungen enthalten.

Wir werden uns deshalb für eins von diesen Zielen entscheiden, z.B. Produktionsmaximierung, und die anderen Zielgrößen bezüglich Aufwand und Ökologie als einzuhaltende Nebenbedingungen (fixierte Ziele) in der strengen Form von Minimum- oder Maximumanforderungen in das Modell einführen.

Um die Konflikte zwischen ökologischen, siedlungsstrukturellen und ökonomischen Zielvorstellungen praxisrele-

vant behandeln zu können, muß das Abwassermodell in Form eines Mehrregionenmodells entwickelt werden.

Die Methode des linearen Programmierens enthält explizit keine Raumdimensionen, d.h. die Produktionsaktivitäten und die Einwohner eines Gebiets z.B. werden, wenn keine räumlichen Dimensionen explizit angegeben sind, als in einem Punkt konzentriert betrachtet. Dies impliziert die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Aktivitäten über das Gesamtgebiet. In der Realität sind aber die Bevölkerung und die Produktionsaktivitäten eines Flußeinzugsgebietes von einiger Größenordnung in vielen mehr oder weniger konzentrierten Räumen am Fluß entlang verteilt, wobei eine Homogenität der Industrieansiedlungen bezüglich Abwassermengen und Schadstoffkonzentrationen kaum angenommen werden kann.

Ferner kann in den meisten Fällen davon ausgegangen werden, daß eine Abwassereinleitungsstelle für das gesamte Flußeinzugsgebiet aufgrund der Überbeanspruchung der Verdünnungskapazität des Flußwassers, Vernachlässigung der terminalen Reinigungsstufe, hohen Kanalisationskosten usw. unrealistisch ist.

Werden aber die Fließgewässer in mehrere Flußabschnitte unterteilt und ordnen wir die jeweils anliegende Industrie- und Wohnansiedlung durch eine oder mehrere Einleitstellen einem Flußabschnitt zu, entfallen die erwähnten Schwierigkeiten weitgehend.

Eine auf diese Weise durchgeführte Regionalisierung eines Flußeinzugsgebiets ermöglicht erstens eine genaue Prüfung der vorhandenen Struktur der Industrie- und Wohnsiedlungen

im Hinblick auf deren Flußwasserbelastung und zweitens die Ermittlung der optimalen Allokation von neuanzusiedelnden Gewerbebetrieben und Wohnbevölkerung.

Durch die Größe der Regionen, der Flußabschnitte und des Abstandes zwischen den Einleitstellen zweier oder mehrerer Flußabschnitte wird die Dimension Raum explizit in das Modell aufgenommen.

3 Die Intentionen des Abwassermodells

Zusammenfassend können die obigen Gesichtspunkte folgendermaßen formuliert werden:
Zielsetzung des Abwassermodells ist es, ein multiregionales und multisektorales Programmierungsmodell zur Ermittlung des optimalen Niveaus und der regionalen Verteilung von ökonomischen Aktivitäten unter besonderer Berücksichtigung der Verschmutzung der Fließgewässer eines geschlossenen Flußeinzugsgebietes durch Abwässer zu erstellen.

Das Modell ist statisch und nimmt auf das Jahr 1970, das Jahr des letzten BRD-Zensus, bezug. Alle Produktionswerte sind Jahreswerte, die ökologischen Daten sind durchschnittliche Tageswerte.

4 Das zugrundegelegte Modell

Zur Vereinfachung der Darstellung sollen die in dem Modell enthaltenen Annahmen und funktionalen Beziehungen zuerst anhand einer einzelnen Region erläutert werden. Der Aufbau des Modells ist schematisch in Schaubild 1 in Vektoren- und Matrizenschreibweise dargestellt. Nach Erläuterung dieses Tableaus soll das tatsächliche Untersuchungsgebiet, das Mehrregionenmodell und die funktionalen Beziehungen zwischen Regionen beschrieben werden.

Constraint	X'	C^*_{pr}	C^*_{St}	ΔK^*	E^*_A	$E^*_A - M^*_A$	$\Delta V'$	Y^*	P^*	${}^2_0O^*$	${}^1_1O'$	${}^1_2O'$	${}^2_2O'$	${}^2_3O'$	R^*	RHS
Dimensionen	Mio DM								1000	m^3					g	diverse Dimensionen
Z						-1	$-i'$	$+1$								Max
Wirtschaftssektoren	$I-A$	$-d_{pr}$	$-d_{St}$	$-b$	$-e$		$-I$									$=$ 0
Y^*	w'							-1								$=$ 0
C^*_{pr}		-1 -1						τ_1 τ_2								$\leq$ 0 $\leq$ 0
C^*_{St}			-1 -1					ν_1 ν_2								$\leq$ 0 $\leq$ 0
ΔK^*				-1 -1				φ_1 φ_2								$\leq$ 0 $\leq$ 0
M^*_A	$-m_x'$	$-m_{pr}$		$-m_k$	$1-m_E$	-1										$=$ 0
$E^*_A - M^*_A$						-1 -1		ψ_1 ψ_2								$\leq$ 0 $\leq$ 0
Y^*_{min}								$+1$	$-\bar{\omega}$ -1							$\geq$ 0
P^*	g'															$=$ Pendlersaldo
Beschäftigte der Wirtschaftssektoren	$\hat{l}$															$\geq$ $L \cdot 0.8$ $L \cdot 1.2$
Abwasserbilanzen	${}_1\hat{u}$								${}_0u$ -1	$-I$						$=$ 0
	${}_2\hat{u}$										$-I$	$-I$				$=$ 0
	${}_3\hat{u}$												$-I$			$=$ 0
Schmutzbilanz										${}_8h'$					-1	$=$ 0
Wasserqualitätsstandards															$+1$	$\leq$ BSB-Standard
															γ	$\leq$ Sauerstoff-standard

4.1 Die Aktivitäten des Einregionenmodells

Zur Formalisierung des Problems werden Aktivitäten eingeführt, die die vom Gebiet und von außen nachgefragten Gütermengen simultan mit den wasserverunreinigenden Residuen festlegen. Die Produktionsaktivitäten (X_i) sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Dabei gibt der Index i den Sektor i an. Der Grad der Disaggregation hängt einerseits von der Homogenität der zwei produzierten Outputs ab, d.h. von Gütern und Abwasser, und andererseits von den Beschränkungen, die uns die deutsche Abwasserstatistik und die von uns zur Beschreibung der wirtschaftlichen Interdependenzen benutzte Input-Output-Untersuchung auferlegt.

Da die im Wasser gelösten und vom Wasser getragenen Residuen des industriellen Abwassers von der Art der industriellen Nutzung des Wassers abhängen, werden für jeden Sektor i die folgenden Abwasserarten explizit als Aktivitäten eingeführt:

1. ${}_1O_i$ = Kühlwasser

2. ${}_2O_i$ = Fabrikationsabwasser

3. ${}_3O_i$ = Belegschaftsabwasser

Die Abwassermenge aus den Haushalten wird mit ${}_oO$ bezeichnet.

Während ${}_1O_i$, ${}_2O_i$, ${}_3O_i$ direkt mit der Güterproduktion gekoppelt werden, ist das Haushaltsabwasser eine Funktion der Einwohnerzahl (P^*). Bezüglich der Abwasserbehandlung werden folgende Annahmen eingeführt:

Belegschafts- und Haushaltsabwasser <u>müssen</u> vor der Einleitung in das Fließgewässer geklärt werden, während das Kühlwasser direkt in den Fluß eingeleitet werden kann, da die Wassertemperatur des Flusses im Modell vorerst als konstant angesehen wird.

Tabelle 1:

Produktionssektoren

1. Landwirtschaft
2. Energiewirtschaft
3. Kohlebergbau
4. Erdöl-Erdgasgewinnung
5. Eisenerzbau
6. Restl. Bergbau
7. Chemische Industrie
8. Mineralölverarbeitende Industrie
9. Kunststoffverarbeitende Industrie
10. Kautschukindustrie
11. Steine und Erden
12. Feinkeramik und Glasindustrie
13. Eisenschaffende Industrie
14. Eisen-, Stahl- und Tempergießereien
15. NE-Metallindustrie
16. Ziehereien und Kaltwalzwerke
17. Stahlverformung
18. Stahlbau, Straßen-, Luftfahrzeugbau, Maschinen-, Schiffbau
19. Elektrotechnik
20. Feinkeramik, Optik
21. Eisen-, Blech-, Metallwarenindustrie
22. MSSS-Industrie
23. Holzbearbeitung
24. Holzverarbeitende Industrie
25. Zellstoff-, Papier-, Pappeerzeugung
26. Papierverarbeitende Industrie und Druckerei
27. Lederindustrie
28. Textilindustrie
29. Bekleidungsindustrie
30. Mühlenindustrie
31. Ölmühlen-, Margarineindustrie
32. Zuckerindustrie
33. Brauerei, Mälzerei
34. Sonstige N.- u. G.-Industrie
35. Handwerk
36. Baugewerbe
37. Handel
38. Verkehr
39. Sonst. Dienstleistungen
40. Staat

Das Fabrikationsabwasser kann direkt oder nach Reinigung in den Fluß eingeleitet werden. Dabei soll mit ${}^{1}_{2}O_i$ die direkte Einleitung der Abwassermenge vom Typ 2 aus Sektor i und mit ${}^{2}_{2}O_i$ die Abwassermenge desselben Ursprungs, die vor der Einleitung gereinigt wird, bezeichnet werden.

Der links hochgestellte Index 1 bzw. 2 gibt bei allen Abwasserarten Einleitung ohne bzw. nach Klärung an.

Mit R wird die Summe der in den geklärten und ungeklärten Abwässern enthaltenen Schadstoffmenge bezeichnet.

Weitere Aktivitäten des Einregionenmodells sind die Nachfrage der öffentlichen und privaten Investitionen (ΔK^*), öffentlicher Konsum (C^*_{st}), privater Konsum (C^*_{pr}), Exporte an das Ausland (E^*), ausländische Importe (M^*_A), Außenhandelssaldo (E^*_A-M^*_A), Zunahme bzw. Abnahme der Lager (ΔV_i) und Bruttoinlandsprodukt (Y^*).

4.1.1 Die Zielfunktion des Einregionenmodells

Folgende Zielfunktion wird in das Modell aufgenommen:

$$Z = Y^* - (E^* - M^*) - \sum_i \Delta V_i \longrightarrow \text{Max !} \qquad i = 1,\ldots,40$$

d.h. das Volkseinkommen soll maximiert werden bei möglichst ausgeglichener Außenhandelsbilanz und bei möglichst ausgeglichenem Verhältnis von Produktion zur Nachfrage.

Die Wahl dieser Zielfunktion impliziert eine Wachstumspolitik für das Untersuchungsgebiet. Dies könnte zur Bevorteilung der regionalen Investitionstätigkeit und zur Vernachlässigung des Konsums führen. Durch die Einführung empirisch ermittelter Relationen bezüglich Produktionsfaktoren, Investitionsneigung und Konsumverhalten wird aber gewährleistet, daß das Modell ein realistisches und politisch vertretbares Verhalten wiedergibt.

4.1.2 Die fixierten Ziele (Nebenbedingungen) des Einregionenmodells

(1) Produktionsgleichgewichte und Endnachfrage

Durch die zugrundegelegte Input-Output-Matrix[1], die die Interdependenzen zwischen den Wirtschaftssektoren beschreibt, sind 40 Produktionsgleichgewichte definiert, die im oberen Teil des Schaubildes 1 in Vektoren- und Matrizenschreibweise eingetragen sind. Dabei werden mit I eine Einheitsmatrix und mit A die Matrix der Leontief'schen Input-Output-Koeffizienten bezeichnet. d_{pr} und d_{St} sind Spaltenvektoren, deren Elemente den Anteil des privaten (pr) und öffentlichen (st) Konsums an der sektoralen Produktion wiedergeben. b ist ein Spaltenvektor der privaten und öffentlichen Investitionskoeffizienten und e enthält die Exportkoeffizienten des Außenhandels.

Die in dem Block "Wirtschaftssektoren" enthaltenen Restriktionen fordern, daß die Produktion jedes Sektors i dem Eigenverbrauch des Sektors, den Lieferungen an andere Sektoren und an die Endnachfrage, unter Berücksichtigung von Lagerveränderungen gleich sein soll .

Das Bruttoinlandsprodukt (Y^*) ergibt sich als Summe der Beiträge aller Produktionssektoren, wobei mit w_j der Beitrag eines Sektors j pro Mio DM Output des Sektors j definiert wird.

---

1) Diese Matrix wurde aus der für das Jahr 1966 vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, für 56 Sektoren ermittelten Input-Output-Matrix abgeleitet. Vgl. R. Stäglin und H. Wessels, Input-Output-Tabellen für die BRD 1966, in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung, Berlin 1971, S.215 - 220.

Es gilt:

$$Y^* = \sum_j w_j X_j \qquad j = 1,\ldots,40$$

Die Restriktion Y^*_{min} garantiert ferner, daß das Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner mindestens eine bestimmte Größe $\bar{w}$ erreicht.

Der private bzw. öffentliche Konsum, d.h. C^*_{pr} bzw. C^*_{st}, und die privaten und öffentlichen Investitionen (ΔK^*) sind als Funktionen des Bruttoinlandsprodukts in dem Modell enthalten. Dabei gibt der Koeffizient τ bzw. ν den Anteil des privaten bzw. öffentlichen Konsums und der Koeffizient φ den Anteil der privaten und öffentlichen Investitionen am Bruttoinlandsprodukt der Region an.

Der Index 1 bzw. 2 gibt den unteren bzw. oberen Wert an, den die Koeffizienten annehmen können, wobei gelten muß:

$$\tau + \nu + \varphi + \psi = 1$$

Die Gleichung M^*_A bestimmt die Importe aus dem Ausland. Dabei gibt der Zeilenvektor m'_x die Importkoeffizienten der Produktionssektoren, der Koeffizient m_{pr} den Importanteil des privaten Konsums, m_k den Importanteil der privaten und öffentlichen Investitionen und m_E den Anteil der Importe an den Exporten (Transithandel) an.

Es gilt:

$$-m'_x X - m_{pr} C^*_{pr} - m_k \Delta K^* + (1 - m_E)\, E^*_A = (E^*_A - M^*_A) \;,$$

wobei X ein Spaltenvektor ist, dessen Elemente die Bruttoproduktionswerte der Sektoren sind und die Größe $(E^*_A - M^*_A)$ positiv sein soll, d.h. ein Außenhandelsüberschuß wird postuliert.

Durch die Restriktion $(E^*_A - M^*_A)$ wird die Größe des Außenhandelsüberschusses nach unten und nach oben in Abhängigkeit vom Bruttoinlandsprodukt (und damit von der Produktion) beschränkt.

(2) Bevölkerung und Arbeitskräfte

Die Bevölkerung der Region ist durch sektorale Beschäftigungskoeffizienten l_j und die Erwerbsquote $\varkappa$ eng mit der Produktion verbunden. Bezeichnen wir mit L_j die Arbeitskräfte in dem Sektor j, so gilt:

$$L_j = l_j \cdot X_j$$

und $\qquad j = 1,\ldots,40$

$$\sum_j L_j = \varkappa P^*$$

Hieraus folgt für die Bevölkerungsgleichung P^*:

$$P^* = \frac{1}{\varkappa} \sum_j l_j X_j \equiv \sum_j g_j X_j$$

Diese Gleichung wird ferner um den Pendlersaldo bereinigt. Da die Ausstattung mit Realkapital durch die Gleichung ΔK^* gesichert wird, bleibt für den "Wirtschaftsteil" des Einregionenmodells nur noch die Einführung des Produktionsfaktors Arbeit übrig.

Wir bezeichnen mit $\hat{l}$ eine Diagonalmatrix, deren Elemente die sektoralen Beschäftigungskoeffizienten l_j (j=1,...,40) sind. Der sektorale Arbeitseinsatz unterliegt dann der Restriktion

$$0.8L \leq \hat{l}X \leq 1.2L ,$$

wobei L ein Spaltenvektor ist, dessen Elemente die Arbeitskräfte der Sektoren am Anfang der Planungsperiode sind.

Dies bedeutet, daß die Fluktuation der Beschäftigten innerhalb der Sektoren im Planungszeitraum lediglich ± 20 v.H des Arbeitseinsatzes am Anfang der Planungsperiode betragen darf.

(3) Abwasserbilanzen

Die Erzeugung von Abwässern durch die Produktion und durch die Einwohner der Region wird als Kuppelproduktion in das Modell eingeführt, d.h. es wird ein konstantes Verhältnis (u) zwischen dem Output eines Sektors bzw. zwischen den Einwohnern einer Region und der Abwassermenge angenommen.

Dies muß allerdings nicht so verstanden werden, als ob wir uns der Tatsache nicht bewußt sind, daß der Abwasserausstoß pro Einheit Output im Zeitverlauf variabel sein kann. In mehreren Industrien hat sich dieses Verhältnis aufgrund von Änderungen in der Produktionstechnik und durch gestiegene Kreislaufnutzung (insbes. von Kühlwasser) verringert.

Der zu erwartende Einfluß dieser potentiellen Fehlerquelle auf die Modellergebnisse hängt aber von der Länge des Planungszeitraumes ab.

Bei einer Überprüfung der sektoralen Abwasserkoeffizienten über einen Zeitraum von sechs Jahren waren aber nur bei einigen wenigen Sektoren ins Gewicht fallende Änderungen zu verzeichnen. Es wurde deshalb beschlossen, die konstanten Verhältniskoeffizienten in dieser ersten Modellphase zu benutzen. Wir definieren mit $\hat{u}$ eine Diagonalmatrix, deren Elemente u_i (i=1,...,40) die Abwassermenge (m^3) pro Einheit Output (Mio.DM) jedes der i Sektoren wiedergeben.

Unter Berücksichtigung der oben definierten Abwasserarten haben wir für die Menge der Sektoren folgende drei Abwasserbilanzen:

$$ {}_1\hat{u}\hat{X} = {}^1_1\hat{0} $$

$$ {}_2\hat{u}\hat{X} = {}^1_2\hat{0} + {}^2_2\hat{0} $$

$$ {}_3\hat{u}\hat{X} = {}^2_3\hat{0} $$

Dabei ist X ein Vektor, dessen Elemente die Bruttoproduktionswerte, und ${}^{s}_{n}O$ (s=1,2,3; n=1,2) vier Vektoren sind, deren Elemente die nach Nutzungs- und Einleitungsarten unterteilten sektoralen Abwassermengen sind.

Zur Bestimmung der Menge des Haushaltsabwassers ${}^{2}_{o}O$ wird folgende Gleichung eingeführt:

$$ {}_{o}uP^{*} = {}^{2}_{o}O^{*} $$

Der Koeffizient ${}_{o}u$ gibt die Abwassermenge pro Kopf an.

(4) Schmutzbilanz und Wasserqualitätsstandards

Die Abwässer können, wie oben erwähnt, grob in die Gruppen organisch und anorganisch belastete Abwässer unterteilt werden. Als Maß für die organische Belastung wird der sogenannte biochemische Sauerstoffbedarf (BSB_t) herangezogen. Dieses Maß gibt die Sauerstoffmenge an, die erforderlich ist, um eine Einheit organisches Material in einer bestimmten Zeit (t) abzubauen.

In größeren und stark mit Abwässern belasteten Flüssen werden die Sauerstoffaufnahme aus der Atmosphäre und die Selbstreinigungskapazität im wesentlichen von der organischen Belastung des Wassers beeinflußt, die so zum determinierenden Faktor des Gesamtstoffwechsels wird.

Die Konzentration von organischen Stoffen im Flußwasser ($^{g}/m^{3}$) wird deshalb als Qualitätsindikator in das Modell eingeführt. Wir berechnen dabei die Wirkung der organischen Belastung auf den gelösten Sauerstoff im Flußwasser, der eine untere Grenze nicht unterschreiten darf und verlangen gleichzeitig, daß die absolute BSB-Konzentration eine obere Grenze nicht überschreiten soll.

Bei Industriezweigen, die überwiegend anorganische Abwässer haben, werden Schmutzbeiwerte, in denen die Auswirkungen giftiger Stoffe auf den BSB-Abbau berücksichtigt

werden, bei der Festlegung des "BSB-Ausstoßes" dieser Industrie zugrundegelegt.

Es muß aber hervorgehoben werden, daß auf dem Gebiet der anorganischen Verunreinigungen noch eine große Informationslücke, sowohl was die tatsächlich anfallenden Mengen als auch die synergetischen Effekte betrifft, besteht. Die Schmutzbeiwerte unterliegen deshalb einer gewissen Willkür. Es ist zu erwarten, daß die neue Abwasserstatistik nicht nur wie bisher die anfallenden Abwassermengen, sondern auch die wichtigsten anfallenden Inhaltsstoffe ermittelt. Auf dem Gebiet der synergetischen Effekte werden schon seit längerer Zeit, u.a. beim Ruhrverband, Forschungsarbeiten durchgeführt. Das Abwassermodell kann beim Vorliegen dieser Informationen leicht explizit um die betreffenden Schadstoffgruppen erweitert werden.

In dem vorliegenden Modell wird mit ${}_{B}h'$ ein Zeilenvektor definiert, dessen Elemente die als konstant angesehenen BSB-Konzentrationen der Abwasserarten der Produktionssektoren und der Haushalte sind. Bei der Festlegung der BSB-Koeffizienten wird berücksichtigt, ob das jeweilige Abwasser geklärt oder ungeklärt in den Fluß eingeleitet wird.

Die durch Produktion und Bevölkerung insgesamt entstehende BSB-Menge (R) ergibt sich aus

$$ {}_{B}h' \cdot O = R $$

wobei O ein Spaltenvektor, dessen Elemente die Abwassermenge ${}^{2}_{0}O^{*}$ und die Abwassermengen (Elemente) der Vektoren ${}^{1}_{1}O$, ${}^{1}_{2}O$, ${}^{2}_{2}O$ und ${}^{2}_{3}O$ sind.

Im Rahmen der simultanen Lösung des Modells werden unter Berücksichtigung der jeweiligen BSB-Konzentration die zu klärenden Abwassermengen der einzelnen Sektoren endogen ermittelt. In welchem Umfang eine Klärung stattfinden muß, hängt von der im Fluß tolerierbaren BSB-Konzentration, der erwünschten Menge an gelöstem Sauerstoff, der Wasserführung,

dem Reinigungsgrad der Kläranlage und der Abwasserart und Menge ab. Ferner spielt die Selbstreinigungskraft, d.h. die Fähigkeit des Flusses pro Zeiteinheit schädliche Stoffe abzubauen (Abbaurate), und die Geschwindigkeit, mit der der Fluß fehlenden Sauerstoff aus der Luft bzw. durch Wasserpflanzen ersetzen kann (Wiederbelüftungsrate) eine große Rolle.

Im Schaubild 1 sind die Wasserqualitätsstandards in den letzten zwei Zeilen angedeutet worden.

Die BSB-Menge des Flußwassers wird unmittelbar nach der Einleitung des Abwassers geprüft, wobei gelten soll:

$$R(^{gBSB}/m^3) \leq \text{BSB-Standard } (^{gBSB}/m^3)$$

Während der Fließzeit werden die im Wasser enthaltenen organischen Stoffe von Mikroorganismen oxidativ abgebaut[1]. Bei den Abbauvorgängen verringert sich der im Wasser gelöste Sauerstoff. Gleichzeitig wird Sauerstoff vom Wasser aufgenommen, aber während einer gewissen Fließzeit nach der Einleitung überwiegt normalerweise der Sauerstoffverbrauch, was ein Sauerstoffdefizit zur Folge hat[2]. Bezeichnen wir mit Sauerstoffstandard ein bestimmtes tolerierbares Sauerstoffdefizit im Flußwasser und mit γ das Sauerstoffdefizit, das während einer bestimmten Fließzeit pro Einheit organisches Material entsteht,

---

1) Dies gilt auch zu einem gewissen Grad für Säuren, Gifte, Mineralöle, Phenole usw. Allerdings haben diese Stoffe eine geringere Abbaugeschwindigkeit und hemmen die biologischen Abbauvorgänge. Die oben erwähnten Schmutzbeiwerte sind durch Untersuchungen über den Grad der Hemmung der Abbaugeschwindigkeit bei verschiedenen giftigen u.a. Stoffen ermittelt worden.

2) Das Sauerstoffdefizit wird definiert als die Differenz zwischen dem Sauerstoffsättigungswert und der tatsächlich vorhandenen Menge an gelöstem Sauerstoff im Flußwasser.

so kann die zur Sicherung des Sauerstoffhaushaltes erforderliche Nebenbedingung wie folgt formuliert werden:

$$\gamma R \ (g/m^3) \leq \text{Sauerstoffstandard} \ (g/m^3) \ .$$

Dabei wird der Sauerstoffstandard wie folgt definiert:

Sättigungswert (g/m^3) - unterste zulässige Sauerstoffkonzentration (g/m^3)

= Sauerstoffstandard, i.e. höchstzulässiges Sauerstoffdefizit (g/m^3)

4.2 Das Abwassermodell als Mehrregionenmodell

Aufgrund der anfangs dargestellten Überlegungen ist das Abwassermodell, das zur Zeit auf der Rechenanlage der Universität Münster getestet wird, als multiregionales Modell konstruiert worden. Dies hängt auch damit zusammen, daß die interessantesten Probleme in diesem Bereich mit dem Abbau und dem Transport der Schadstoffe im Flußwasser zusammenhängen.

Zur Vereinfachung der Darstellung ist der Aufbau des Mehrregionenmodells schematisch nach demselben Muster wie das Einregionenmodell für zwei "Wasserregionen" dargestellt worden (Schaubild 4).

Das Gesamtgebiet der "Wasserregionen" soll im weiteren als der Untersuchungsraum bezeichnet werden.

4.2.1 Der Untersuchungsraum

Das Flußgebiet der Ruhr, das unter der wasserwirtschaftlichen Hoheit des Ruhrverbandes steht (Schaubild 2), bildet den Untersuchungsraum.

Da es keine für das Modell relevanten ökonomischen Daten für das Verbandsgebiet gibt, sind die in diesem Raum vorhandenen Stadt- und Landkreise unter Berücksichtigung topographischer und hydrologischer Gegebenheiten zu vier Re-

gionen zusammengefaßt worden (Schaubild 3). Wir können die vier Regionen des Untersuchungsraumes grob bezeichnen als:

(1) Die obere Ruhr (Region 1)
(2) Das Lennegebiet (Region 2)
(3) Das Gebiet Ennepe/Volme (Region 3)
(4) Die untere Ruhr (Region 4)

Jede dieser Regionen leitet ihr Abwasser nur in ihrem eigenen Teil der Ruhr oder in einen der Nebenflüsse ein.

4.2.2 Die Zielfunktion des Mehrregionenmodells

Wir bezeichnen mit dem Index r (r=1,...,4) die jeweilige Region. Als Zielfunktion des Modells wird die Bedingung

$$\sum_r Y^r - \sum_r (E_A^r - M_A^r) - \sum_{ri}\sum \Delta V_i^r \longrightarrow \text{Maximum} \qquad i = 1,\ldots,40$$

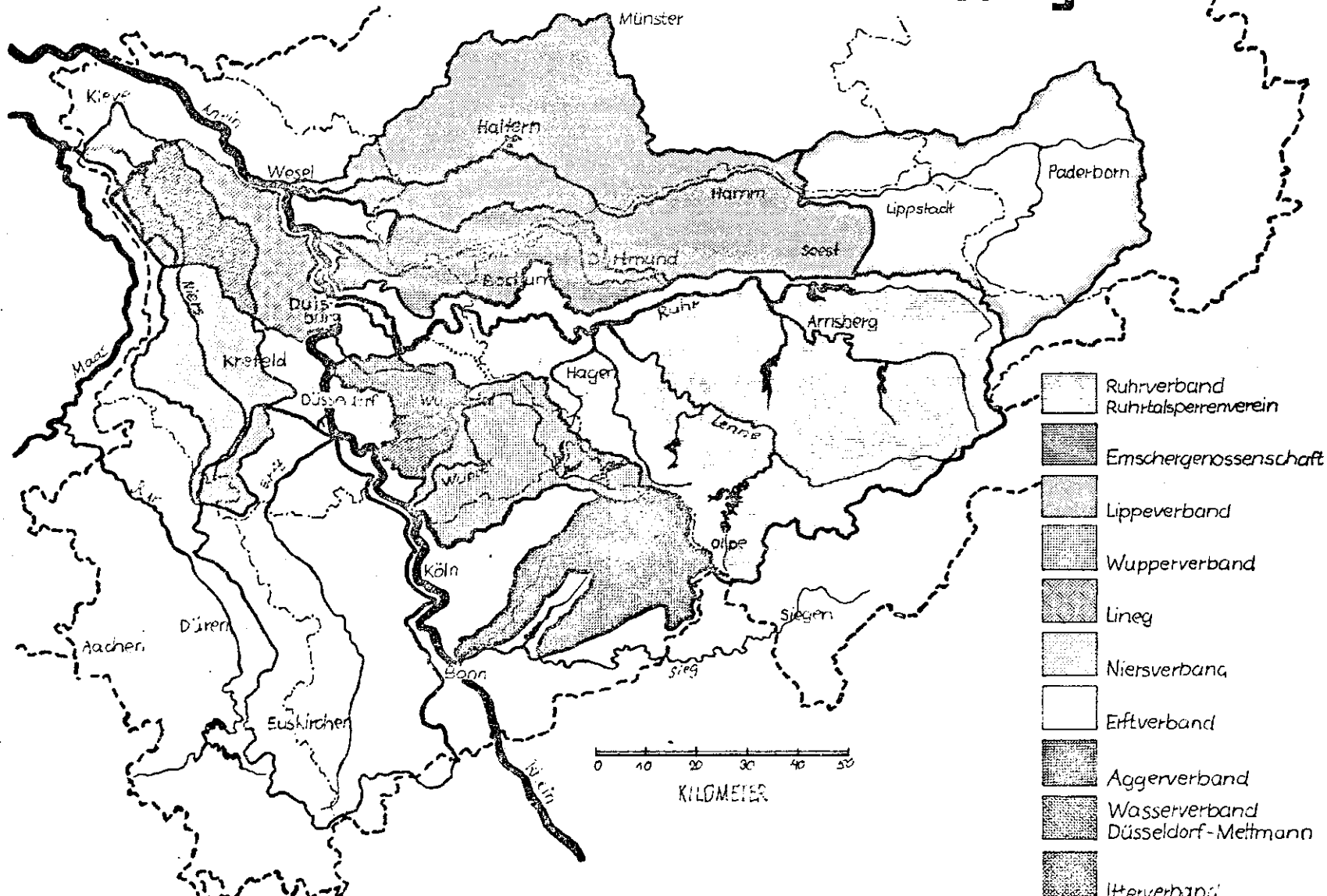
verwendet, d.h. das Bruttoinlandsprodukt des Untersuchungsraumes soll maximiert werden.

Wie im Einregionenmodell zählen aber dabei nur die Teile der Produktion, die wirklich einer sinnvollen Verwendung im Inland zugeführt werden, d.h. nicht bewertet werden die unfreiwilligen Lagerinvestitionen (Halden) und der Teil der Produktion, der als Außenhandelsüberschuß dem Untersuchungsraum verlorengeht.

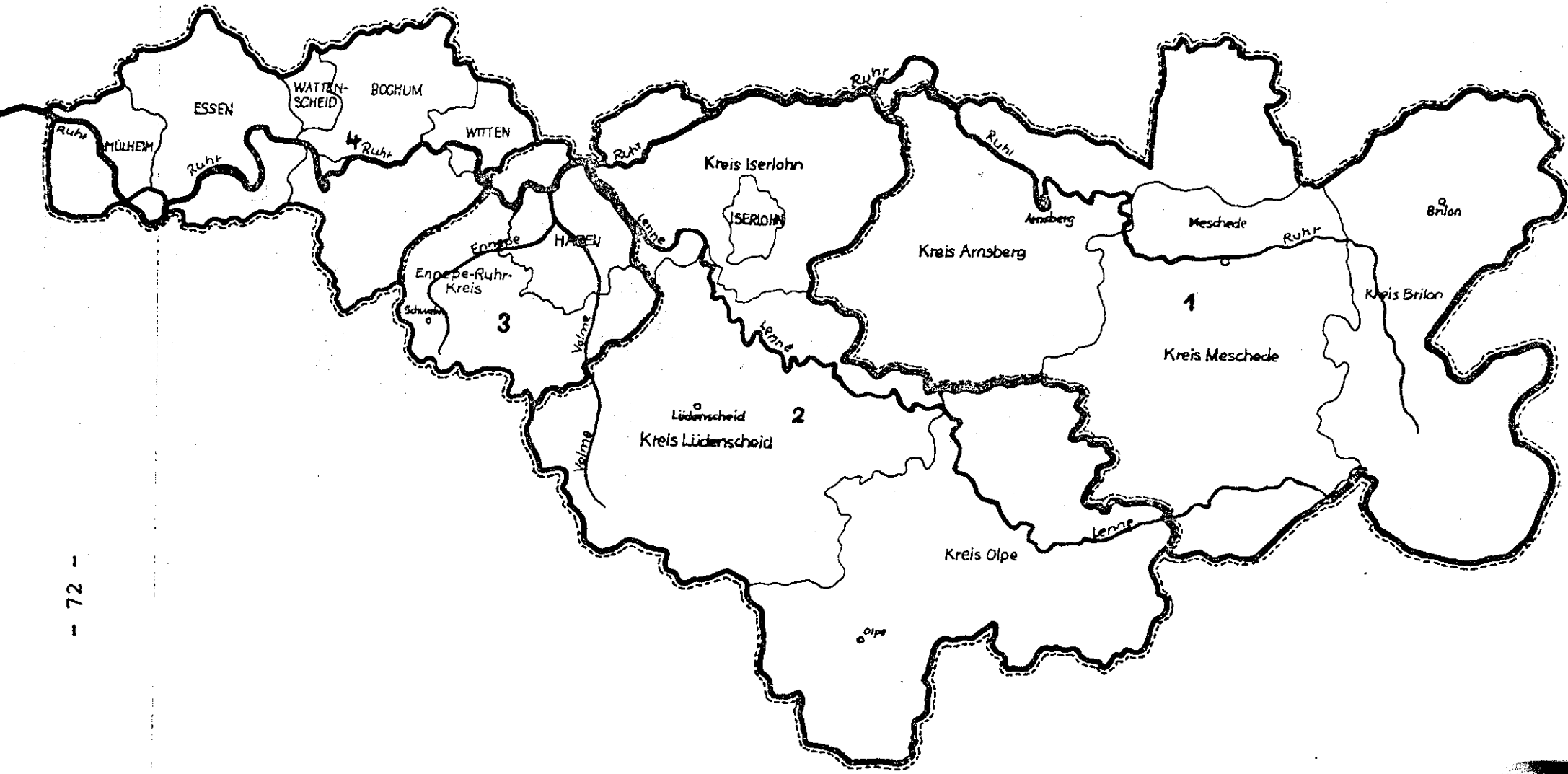
Der Güteraustausch zwischen dem Untersuchungsraum und dem Rest der Bundesrepublik wird dabei nicht als Außenhandel betrachtet.

Schaubild 2 :

Wasserwirtschaftsverbände im rheinisch-westfälischen Industriegebiet



	km²	Einw. in 1000
Ruhrverband Ruhrtalsperrenverein	4444	2161
Emschergenossenschaft	850	2770
Lippeverband	2781	1220
Wupperverband	945	1075
Lineg	968	395
Niersverband	348	637
Erftverband	2689	1401
Aggerverband	847	209
Wasserverband Düsseldorf-Mettmann	334	260
Itterverband	152	249


ESSEN
WATTEN-SCHEID
BOCHUM
MÜLHEIM
WITTEN
Ruhr
4
Kreis Iserlohn
ISERLOHN
Kreis Arnsberg
Arnsberg
Meschede
Brilon
Kreis Brilon
1
Kreis Meschede
Enneper-Ruhr-Kreis
Schwerte
3
HAGEN
Lenne
Volme
Lüdenscheid
2
Kreis Lüdenscheid
Kreis Olpe
Olpe

4.2.3 Die fixierten Ziele (Nebenbedingungen des Mehrregionenmodells)

(1) Produktionsgleichgewichte und Endnachfrage

Die Aktivitäten des Mehrregionenmodells sind, abgesehen von einigen Erweiterungen, mit denen des Einregionenmodells identisch. Zu beachten ist lediglich, daß die "Wasserregionen" gegenüber dem "Rest der Welt", d.h. gegenüber dem Rest der Bundesrepublik und dem Ausland, als eine Region in Erscheinung treten. Zur Veranschaulichung soll dieser Tatbestand anhand zweier Regionen formal dargestellt werden.

Mit X^r wird ein Spaltenvektor, dessen Elemente die Bruttoproduktionswerte aller Sektoren der Region r (r=1,2) sind, und mit B^r die Endnachfrage (ohne Importe und Exporte) der Region r definiert. Mit M_I^r werden die Importe aus dem Rest der BRD und mit E_I^r die Exporte an den Rest der BRD bezeichnet. Ferner gilt für die Import- bzw. Exportbeziehungen der zwei Regionen untereinander $M^{r,s}$ bzw. $E^{r,s}$ (r,s=1,2).

Unter Berücksichtigung der Import-/Exportbeziehungen (M_A^r/E_A^r) der jeweiligen Region r mit dem Ausland gelten definitionsgemäß folgende zwei Güterbilanzen:

(Region 1)

$$(I - A)X^1 - B^1 - E_A^1 + M_A^1 - E_I^1 + M_I^1 - E^{1,2} + M^{2,1} = 0$$

(Region 2)

$$(I - A)X^2 - B^2 - E_A^2 + M_A^2 - E_I^2 + M_I^2 - E^{2,1} + M^{1,2} = 0$$

Unter Beachtung der tautologischen Beziehung, daß die Exporte der einen Region gleich den Importen der anderen sein müssen,

d.h. $E^{1,2} = M^{1,2}$, (und umgekehrt)

kann für zwei Regionen folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$(I - A)X^1 - B^1 - E_A^1 + M_A^1 + (I - A)X^2 - B^2 - E_A^2 + M_A^2 - E_I^1 - E_I^2 + M_I^1 + M_I^2 = 0$$ [1]

Die Zusammenfassung mehrerer Regionen geht analog vor sich. Wie aus Schaubild 4 hervorgeht, werden die privaten und öffentlichen Investitionen (ΔK^r), der private bzw. öffentliche Konsum (C_{pr}^r bzw. C_{st}^r), die Bruttoproduktionswerte (X_i^r), das Bruttoinlandsprodukt (Y^r), die Bevölkerung (P^r) und die ausländischen Exporte bzw. Importe der jeweiligen Region r wie im Einregionenmodell bestimmt.

Wir bezeichnen mit M^* die Gesamtimporte bzw. mit E^* die Gesamtexporte des Untersuchungsraumes, d.h.

$$M^* = \sum_r M_I^r + \sum_r M_A^r$$

bzw.

$$E^* = \sum_r E_I^r + \sum_r E_A^r$$ [2]

Wie im Einregionenmodell soll der Außenhandelssaldo ($E_A^* - M_A^*$) sich innerhalb gewisser erwarteter Grenzen halten. Für die gesamten Exporte und Importe des Untersuchungsraumes soll außerdem gelten

$$E^* - M^* \geq 0$$

d.h. für die "Wasserregionen" wird insgesamt ein positiver Handelsüberschuß gefordert.

Für die absolute Höhe der Exporte bzw. der Importe der Regionen an den bzw. aus dem Rest der Bundesrepublik werden keine Restriktionen explizit eingeführt.

Diese durch die Ungleichung ($E^* - M^*$) (Schaubild 4) nur in der Gesamtsumme durch die Gesamtexporte limitierten Importe können durchaus zu negativen Konsequenzen mehrerer Sektoren führen, abhängig von deren relativen Beiträgen zur

1) Siehe hierzu Schaubild 4.
2) Ein hochgestelltes * als Index bedeutet Summierung über alle Regionen.

Wasserverschmutzung. Volkswirtschaftlich gesehen sind dennoch keine negativen Entwicklungen zu befürchten, weil das System gerade so viele Güter und Dienstleistungen produziert, daß die Produktionsfaktoren voll genutzt - eine möglichst hohe Beschäftigung wird dadurch garantiert - und die Flußstandards eingehalten werden.

(2) Restriktionen bezüglich der Wasserverunreinigung

Wie im Einregionenmodell wird die Erzeugung von Abwässern durch die Produktion und durch die Bevölkerung der jeweiligen "Wasserregion" als Kuppelproduktion in das Modell eingeführt. Ferner gibt es in jeder Region nur eine Kläranlage und eine gemeinsame Einleitstelle für geklärtes und ungeklärtes Abwasser, wobei die Abwassereinleitung dort stattfindet, wo der Fluß die Region verläßt. Um eine für das ganze Jahr zufriedenstellende Wasserqualität (wobei BSB- und Sauerstoffkonzentration Qualitätsmerkmale sind) garantieren zu können, wird bei den Belastungsberechnungen von dem im Fluß durch Einspeisungen aus Staudämmen usw. in kritischen Trockenzeiten noch zu haltenden Durchflußwasserstand ausgegangen.

Bezeichnen wir mit S^r die Wassermenge im Fluß kurz vor der Abwassereinleitung und mit Q^r die totale Wassermenge im Fluß unmittelbar nach der Einleitung in der Region r, so gilt unter Berücksichtigung der eingeleiteten Abwassermengen:

$$Q^r = \sum_i [{}^1_1O^r_i + {}^1_2O^r_i + {}^2_2O^r_i + {}^2_3O^r_i] + {}^2_oO^r + S^r \qquad r = 1,\ldots,4$$

Bezeichnen wir ferner mit W^r den Wasserentzug (Trink- und Brauchwasser) und mit Z^r den natürlichen Zufluß (einschließlich Einspeisung aus Staudämmen) in der Region r, so gilt

$$S^r = \begin{cases} Z^r - W^r & \text{für } r = 1 \\ Q^{r-1} + Z^r - W^r & \text{für } r = 2,\ldots,4 \end{cases}$$

Im Schaubild 4 sind diese Beziehungen für Region 1 und Region 2 durch die Gleichungen Q^1, S^2 und Q^2 dargestellt.

Wie im Einregionenmodell wird die BSB-Konzentration unmittelbar nach der Abwassereinleitung in der jeweiligen Region gemessen. Der Sauerstoffhaushalt des Flußwassers wird nach einer bestimmten Fließzeit nach der jeweiligen Einleitung gemessen. Aufgrund von Verdünnungseffekten durch den Zufluß von Nebenflüssen und um kumulative Effekte von Einleitungen aus mehreren Regionen zu berücksichtigen, sind für das Untersuchungsgebiet insgesamt sechs Meßstellen für den Sauerstoffgehalt des Flußwassers erforderlich.

Zur Beschreibung der Beziehungen zwischen der organischen Belastung und dem gelösten Sauerstoff sind die bekannten Streeter-Phelps-Gleichungen in das Modell eingeführt worden.

Unter Annahme von "steady state conditions" der physikalischen Einflußgrößen kann mit Hilfe dieser Gleichungen der Abbau der im Fluß befindlichen BSB-Menge und das Entstehen eines Sauerstoffdefizits als eine lineare Funktion der Fließzeit t^{rs} bzw. t^{rp} ($r,s=1,\ldots,4$; $p=1,\ldots,6$) von der Einleitstelle r bis zur Meßstelle s (BSB-Messung) bzw. p (Messung des Sauerstoffdefizits) formuliert werden.

Aus Informationsmangel kann über die BSB-Belastung und das Sauerstoffdefizit des Flußwassers (S^1) vor der ersten Abwassereinleitung bzw. der natürlichen Zuflüsse (Z^r) keine Aussage gemacht werden. Es wird deshalb vorläufig angenommen, daß diese BSB-Belastung bzw. dieses Sauerstoffdefizit vernachlässigbar klein ist.

Wir bezeichnen mit ${}^s\pi^r$ die Abbaurate der im Fluß vorhandenen BSB-Belastung während der Fließzeit von Einleitstelle r nach Meßstelle s, wobei für $s = r$, ${}^s\pi^r$ gleich Eins ist.

Wie im Einregionenmodell gibt R^r (r=1,...,4) die in der r-ten Region in den Fluß insgesamt eingeleitete BSB-Menge an. Bezeichnen wir mit β^s die höchst zulässige BSB-Konzentration an der Meßstelle s, so kann die BSB-Restriktion des Flußwassers in Region 1 (in Schaubild 4 BSB-Standard genannt) wie folgt formuliert werden:

$$R^1 - \beta^1 Q^1 \leq 0$$

Für die zweite Meßstelle, unmittelbar nach der Abwassereinleitung in Region 2, und unter Berücksichtigung des Wasserentzuges (W^2) während der Fließzeit von Meßstelle 1 nach Einleitstelle 2 gilt die folgende BSB-Restriktion:

$$R^1\ {}^2\pi^1 - \zeta^2 W^2 + R^2 - \beta^2 Q^2 \leq 0\ ,$$

wobei ζ^2 die BSB-Konzentration des in Region 2 entzogenen Flußwassers ist. Allgemein gilt für jede BSB-Meßstelle s des Modells die Restriktion:

$$\sum_{r=1}^{s} R^r\ {}^s\pi^r - \sum_{r=2}^{s} \zeta^r W^r - \beta^s Q^s \leq 0 \qquad (r,s = 1,\ldots,4)$$

Wir bezeichnen mit dem Koeffizienten ${}^p\gamma^r$ das Sauerstoffdefizit, das während der Fließzeit von Abwassereinleitstelle r (r=1,...,4) nach Sauerstoffmeßstelle p (p=1,...,6) pro Einheit organisches Material im Flußwasser entsteht.

Zu beachten ist, daß das Sauerstoffdefizit <u>vor</u> der ersten Abwassereinleitung gleich Null angenommen wird.

Bei der ersten Sauerstoffmeßstelle, die vor der Abwassereinleitung in Region 2 liegt, gilt folgende Restriktion:

$$R^1\ {}^1\gamma^1 - \delta^1 Q^1 \leq 0,$$

wobei mit δ^p allgemein das höchst zulässige Sauerstoffdefizit des Flußwassers an der Sauerstoffmeßstelle p bezeichnet wird (siehe die Restriktion Sauerstoff-St. in Schaubild 4). Für die zweite Meßstelle (nach der zweiten Einleitung) gilt:

$$R^1\ {}^2\gamma^1 - \varsigma^2 W^2 + R^2\ {}^2\gamma^2 - \delta^2 Q^2 \leq 0\ ,$$

wobei ς^2 das Sauerstoffdefizit ($^g/m^3$) des in Region 2 entzogenen Flußwassers ist.

Die Sauerstoffrestriktionen für die weiteren 4 Meßstellen (p=3,...,6) werden analog gebildet.

Zu beachten ist, daß der Koeffizient ${}^s\pi^r$ bzw. ${}^p\gamma^r$ für jedes r,s und p unterschiedlich sein kann. Die Parameter zur Bestimmung dieser Koeffizienten sind aus Meßwerten längs der Fließstrecke zu ermitteln.

Die Koeffizienten ς^r und ς^r können nach einigen Optimierungsläufen mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse ausreichend genau bestimmt werden.

Durch die Einführung der obigen Wasserqualitätsrestriktionen (BSB- und Sauerstoffrestriktionen) und der Bilanzen der Fließwassermengen in das Modell, werden die Interdependenzen zwischen den Regionen bezüglich Produktionsniveau, Siedlungsdichte und Gewässerqualität explizit berücksichtigt.

(3) <u>Investitionskosten und Flächenbedarf der Kläranlagen</u>

In dem Mehrregionenmodell ist die Belebungsanlage vorläufig als einziger Typ von Kläranlagen eingeführt.

Der Reinigungsgrad wird als konstant angenommen, und zwar auf eine 90%-ige Entfernung der BSB-Menge des Rohabwassers festgesetzt.

Da nur ein Anlagentyp mit einem bestimmten Wirkungsgrad betrachtet wird und die laufenden Betriebskosten (evtl. von Energiekosten abgesehen) nur wenig von der zu reinigenden Abwassermenge abhängen, werden nur die gesamten Investitionskosten, und zwar als Funktion des Abwasser-

anfalls, explizit in das Modell eingeführt.

Die pro Stunde zu reinigende Abwassermenge ($^2O^r$) in der Region r ergibt sich als

$$^2O^r = \frac{^2_0O^r + \sum_i (^2_2O^r_i + ^2_3O^r_i)}{t \text{ (Stunden pro Tag)}} \qquad \begin{array}{l} i = 1,\ldots,40 \\ r = 1,\ldots,4 \end{array}$$

Zur Beschreibung der Beziehung zwischen den Investitionen und dem Abwasseranfall wird folgende Funktion herangezogen: [1)]

$$G^r = 127665 \; (^2O^r)^{0.49}$$

d.h. die Investitionskosten nehmen mit steigender Klärwerkskapazität relativ ab.

Da die nicht-lineare Funktion G^r nur von einer Variablen abhängig ist, kann sie mit ausreichender Genauigkeit durch eine polygonale Approximation in vier Teilbereiche (Segmente) linearisiert in das Modell eingeführt werden.

Wir bezeichnen mit Φ_k, $k=1,\ldots,4$, die Abwassermenge, die in dem k-ten Segment gereinigt wird.

Es gilt:

$$\sum_k \Phi_k = {^2O_{Max}} ,$$

wobei $^2O_{Max}$ eine frei wählbare maximale Kapazität (m^3/Stunde) einer Kläranlage ist.

Die Investitionskosten Γ_k für jedes Segment k werden unter Berücksichtigung der obigen Investitionsfunktion ($G^r = f(^2O^r)$) berechnet.

Durch die Einführung der Hilfsvariablen T_k (im Schaubild 4 als Zeilenvektor T' dargestellt), die der Restriktion $0 \leq T_k \leq 1$ unterliegt, können die Gleichungen zur Ermitt-

1) Vgl. D. Kehr und H. Teichmann, Bau- und Betriebskosten öffentlicher Kläranlagen in der Bundesrepublik, Veröffentlichungen der Wasserwirtschaft der TH Hanno-

lung der Investitionskosten für die Kläranlage in der Region r geschrieben werden:

$$
\begin{aligned}
{}^{2}O^{r} &= \sum_{k} \Phi_k T_k \\
G^{r} &= \sum_{k} \Gamma_k T_k \qquad\qquad k = 1,\ldots,4 \\
T_k &\leq 1 \qquad\qquad r = 1,\ldots,4
\end{aligned}
$$

Die Grundstücksfläche (F^r) für Kläranlagen ist ebenfalls eine Funktion der zu reinigenden Abwassermenge ${}^{2}O^{r}$. Es gilt:

$$\epsilon\, {}^{2}O^{r} = F^{r} \quad , \qquad \epsilon = 5.0 \left(\frac{m^2}{m^3 \text{ pro Stunde}}\right)$$

5 Einige Bemerkungen zur Anwendung des Modells

Durch die simultane Lösung des Gleichungssystems wird unter Berücksichtigung der regionalen Interdependenzen, der jeweils unterschiedlichen natürlichen regionalen Gegebenheiten, der vorhandenen Industriestruktur und der Siedlungsdichte und ferner unter Beachtung von regionalem Arbeitsangebot, erwünschten Wasserqualitätsstandards usw. die optimale und anzustrebende Industriestruktur und Siedlungsdichte der einzelnen Regionen ermittelt.

Wir wollen aber entschieden den Eindruck vermeiden, daß wir mit Hilfe solcher Modelle die einzige und beste Lösung von Problemen dieser Art ermitteln können, selbst wenn die Bezeichnung optimal verwendet wird. Dies bezieht sich nämlich auf die mathematische Optimalität des Systems.

Aufgrund der vielen Werturteile, die in das Modell eingehen, betrachten wir vielmehr die Ergebnisse eines Modells dieser Art als eine rationale Grundlage für eine öffentliche Diskussion der zugrundeliegenden normativen Urteile.

In dieser Verbindung muß eine besonders wichtige Eigenschaft der mathematischen Optimierung hervorgehoben werden, nämlich

---

Fortsetzung Fußnote 1):
ver, Hannover 1961, S.43. Die Funktion ist preisbereinigt auf Basis 1970.

die Ressourcenbewertung.
In der oben beschriebenen Form wird das lineare Programm das primale Problem bzw. das Mengenproblem genannt. Zu diesem primalen Problem gibt es eine direkte Entsprechung, das duale Problem, eine Umformung des Mengenproblems. Der Dualansatz enthält dadurch besondere Bedeutung, daß er eine eindeutige Bewertung der nur beschränkt vorhandenen Ressourcen bzw. der politischen Zielsetzungen und Normen in Form der bekannten Opportunitätskosten oder Schattenpreise ermöglicht.

Dieser Bewertungsvorgang ähnelt den Vorgängen auf einem vollkommenen Markt, auf dem die Benutzer der Produktionsfaktoren durch Wettbewerb gezwungen werden, den Besitzern der Faktoren den vollen Wert anzubieten, den der Besitz der Faktoren hervorruft, wohingegen der Wettbewerb die Faktorpreise bis zu einem marktkonsistenten Minimum drückt. Dualpreise können für den Umweltplaner von großem praktischen Nutzen sein; sie ermöglichen ihm die Simulation eines Marktmechanismus in einer Umgebung, in der der Wettbewerb fehlt. Die Dualkosten bilden das grundlegende Kriterium für die Beurteilung der Zweckmäßigkeit, Normen bzw. Qualitätsstandards in einer bestimmten Höhe festzusetzen. Sie geben uns den Grenznutzen bzw. die Grenzkosten einer Änderung im System an, z.B. die Ansiedlung einer bestimmten Industriekombination, ausgedrückt in Einheiten der Zielfunktion.

Es ist zu hoffen, daß Modelle dieser Art, die die von Menschen nicht simultan zu überschauenden, komplexen Interdependenzen zwischen Natur und Gesellschaft aufzeigen, weiterentwickelt und in zunehmendem Maße als Informationsinstrument <u>bei</u> - und damit auch zur Konkretisierung <u>von</u> - politischen und wirtschaftlichen Entscheidungsprozessen bezüglich Arbeitsplätze, Einkommenserzielung und sozialer Sicherheit einerseits und einer gesunden, menschenfreundlichen Umwelt andererseits eingesetzt werden.

Ein Schritt zur Versachlichung der allzu oft nur auf emotionaler und ideologischer Basis geführten Umweltdiskussion wäre damit getan.

Verzeichnis der verwendeten Symbole im Mehrregionenmodell

Zur Schreibweise: ' definiert einen Zeilenvektor
^ definiert eine Diagonalmatrix
- definiert einen Durchschnittswert

Symbol	Erklärung
	Aktivitäten
X	Vektor der sektoralen Bruttoproduktionswerte in Mio DM pro Jahr, 40 x 1
C_{pr}	Privater Konsum in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
C_{St}	Staatlicher Konsum in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
ΔK	Private und öffentliche Investitionen in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
E_A	Exporte an das Ausland in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
M_A	Importe aus dem Ausland in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
E_I	Vektor der sektoralen Exporte an den Rest der Bundesrepublik in Mio DM pro Jahr, 40 x 1
M_I	Vektor der sektoralen Importe aus dem Rest der Bundesrepublik in Mio DM pro Jahr, 40 x 1
$E_A - M_A$	Außenhandelsüberschuß in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
ΔV	Vektor der sektoralen Lagerbestandsänderungen in Mio DM pro Jahr, 40 x 1
Y	Bruttoinlandsprodukt in Mio DM pro Jahr, 1 x 1
P	Einwohnerzahl in tausend Personen, 1 x 1
${}^{2}_{0}O$	Abwassermenge der Haushalte (wird geklärt) in m^3 pro Zeiteinheit, 1 x 1
${}^{1}_{1}O$	Vektor der sektoralen Kühlwassermengen (ungeklärt eingeleitet) in m^3 pro Zeiteinheit, 40 x 1
${}^{1}_{2}O$	Vektor der sektoralen Produktionsabwassermengen (ungeklärt eingeleitet) in m^3 pro Zeiteinheit, 40 x 1
${}^{2}_{2}O$	Vektor der sektoralen Produktionsabwassermengen (wird geklärt) in m^3 pro Zeiteinheit, 40 x 1
${}^{2}_{3}O$	Vektor der Belegschaftsabwassermengen (wird geklärt) in m^3 pro Zeiteinheit, 40 x 1

z_0	Insgesamt geklärte Abwassermenge in m^3 pro Zeiteinheit, 1 x 1
R	Insgesamt in den Fluß eingeleitete BSB-Menge in Gramm pro Zeiteinheit, 1 x 1
T	Vektor von Hilfsaktivitäten, die erforderlich sind, um die nicht-linearen Klärwerksinvestitionen berechnen zu können, 4 x 1
G	Investitionskosten der Kläranlage in Mio DM, 1 x 1
F	Flächenbedarf der Kläranlage in Hektar, 1 x 1
S	Wassermenge im Fluß unmittelbar vor einer Abwassereinleitung in m^3 pro Zeiteinheit, 1 x 1
Q	Wassermenge im Fluß unmittelbar nach einer Abwassereinleitung in m^3 pro Zeiteinheit, 1 x 1
W	Wasserentzug (Trink- und Brauchwasser) in m^3 pro Zeiteinheit, 1 x 1
Z	Natürlicher Wasserzufluß in m^3 pro Zeiteinheit, 1 x 1

<u>Koeffizienten</u>

I	Einheitsmatrix
i	Vektor, dessen Elemente Werte von Eins sind
A	Matrix der Input-Output-Koeffizienten in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr. Ein Element a_{ij} der Matrix A (i=1,...,40); (j=1,...,40) gibt den Wert des von Sektor i an Sektor j gelieferten Inputs an, der für Sektor j erforderlich ist, um einen Output in Höhe von 1 Mio DM zu produzieren.
d_{pr}	Vektor der Anteile des privaten Konsums an der sektoralen Produktion in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 40 x 1
d_{St}	Vektor der Anteile des staatlichen Konsums an der sektoralen Produktion in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 40 x 1
b	Vektor der Anteile der privaten und öffentlichen Investitionen an der sektoralen Produktion in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 40 x 1
e	Vektor der Anteile des Exports an das Ausland an der sektoralen Produktion in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 40 x 1
w	Vektor, dessen Elemente w_j (j=1,...,40) den Beitrag (Mio DM) des Sektors j an das Bruttoinlandsprodukt pro Mio DM Output des Sektors j angeben, 40 x 1
m_X	Vektor der sektoralen Importkoeffizienten (Auslandsimporte) in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 40 x 1

m_{pr}	Importkoeffizient (Auslandsimporte) der privaten Haushalte in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
m_K	Importkoeffizient (Auslandsimporte) der privaten und öffentlichen Investitionen in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
m_E	Importkoeffizient des Transithandels in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
L	Vektor der sektoral Beschäftigten in tausend Personen, 40 x 1
g	Vektor von Elementen, die die Beziehung zwischen Produktion und Einwohnerzahl beschreiben, in tausend Personen pro Mio DM, 40 x 1
l	Vektor der sektoralen Beschäftigungskoeffizienten in Beschäftigten pro Mio DM, 40 x 1
τ	Konsumquote der privaten Haushalte in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
ν	Konsumquote der öffentlichen Haushalte in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
φ	Investitionsquote der privaten und öffentlichen Investitionen in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
Ψ	Koeffizient des Außenhandelsüberschusses in Mio DM pro Jahr pro Mio DM pro Jahr, 1 x 1
$\bar{\omega}$	Mindesteinkommen pro Kopf der Einwohner in Mio DM pro Jahr pro tausend Einwohner, 1 x 1
o^u	Koeffizient des Haushaltsabwassers in m^3 pro Kopf und Zeiteinheit, 1 x 1
1^u	Vektor der sektoralen Kühlwasserkoeffizienten in m^3 pro Mio DM, 40 x 1
2^u	Vektor der sektoralen Fabrikationsabwasserkoeffizienten in m^3 pro Mio DM, 40 x 1
3^u	Vektor der Belegschaftsabwasserkoeffizienten in m^3 pro Mio DM, 40 x 1
B^h	Vektor der BSB-Koeffizienten aller Abwasser- und Einleitungsarten in Gramm pro m^3 und Zeiteinheit, 122 x 1
π	Koeffizient des BSB-Abbaus in Gramm BSB pro Zeiteinheit, 1 x 1
γ	Koeffizient des Sauerstoffdefizits in Gramm Sauerstoffdefizit pro Zeiteinheit, 1 x 1
Φ_k	Koeffizient, der die k-te Kapazitätsstufe einer Kläranlage angibt, in m^3 pro Zeiteinheit, $k = 1,\ldots,4$
Γ_k	Koeffizient, der die Investitionskosten der k-ten Kapazitätsstufe einer Kläranlage angibt, in Mio DM $k = 1,\ldots,4$
ϵ	Koeffizient des Flächenbedarfs einer Kläranlage in Hektar pro m^3 und Zeiteinheit, 1 x 1

β	BSB-Standard in Gramm pro m^3, 1 x 1
δ	Sauerstoffdefizitstandard in Gramm pro m^3, 1 x 1
ζ	BSB-Konzentration des entzogenen Flußwassers in Gramm pro m^3, 1 x 1
ξ	Sauerstoffdefizit des entzogenen Flußwassers in Gramm pro m^3, 1 x 1

<u>Interpretation der Indizes</u>

r	Regionen bzw. Abwassereinleitstellen
*	Summation über alle Regionen
k	Anzahl der linearen Segmente der Investitionsfunktion der Kläranlage (k = 1,...,4)
s	Meßstelle der BSB-Belastung (s = 1,...,4)
p	Meßstelle des Sauerstoffdefizits (p = 1,...,6)

Peter Döllekes

Die Optimierung der Abgasbelastung in der Bundesrepublik Deutschland

1 Intentionen

Die besondere Problemstellung der Abgasoptimierung liegt darin begründet, daß sich luftbelastende Schadstoffe weder vollständig vermeiden lassen, noch nachträglich strategisch zu vernichten sind. Angesichts dieser Besonderheiten gegenüber anderen Trägermedien (z.B. können Abwässer durch Kläranlagen gereinigt und Abfälle unter anderem durch Verbrennung beseitigt werden) sind die Intentionen des Submodells Abgase zu sehen.

Zum einen wird die Berechnung der Abgasbelastung (incl. Staub) in der BRD für alternative Produktions- und Konsumaktivitäten ermöglicht. Zum anderen soll das Modell Entscheidungshilfen geben hinsichtlich der Bestimmung zulässiger Aktivitätsniveaus in der volkswirtschaftlichen Produktion, für Energie- und Verkehrsträger zur Einhaltung fixierter Luftqualitätsstandards. Insbesondere werden die Auswirkungen für die über das Marktsystem interdependent verbundenen Wirtschaftssektoren (Emissionsverursacher) durch Veränderungen der Emissionsstandards zu verdeutlichen sein.

Darüber hinaus sind die Kosten - hier zu verstehen als Opportunitätskosten - politischer Qualitätsstandards ebenso aufzuzeigen, wie die ökonomischen und ökologischen Konsequenzen potentieller Umweltstrategien, wie z.B. der Prozeßsubstitution einzelner Energieträger.

Die umfassende Beurteilung der politischen Zielfixierung und Mitteldosierung verlangt ein dynamisches, regional und sektoral disaggregiertes Modell. Die komplexe Entscheidungsstruktur wird in einem ersten Schritt einregional und für eine Periode behandelt, weil zunächst der sachliche Schwerpunkt auf die sektorspezifische Dis-

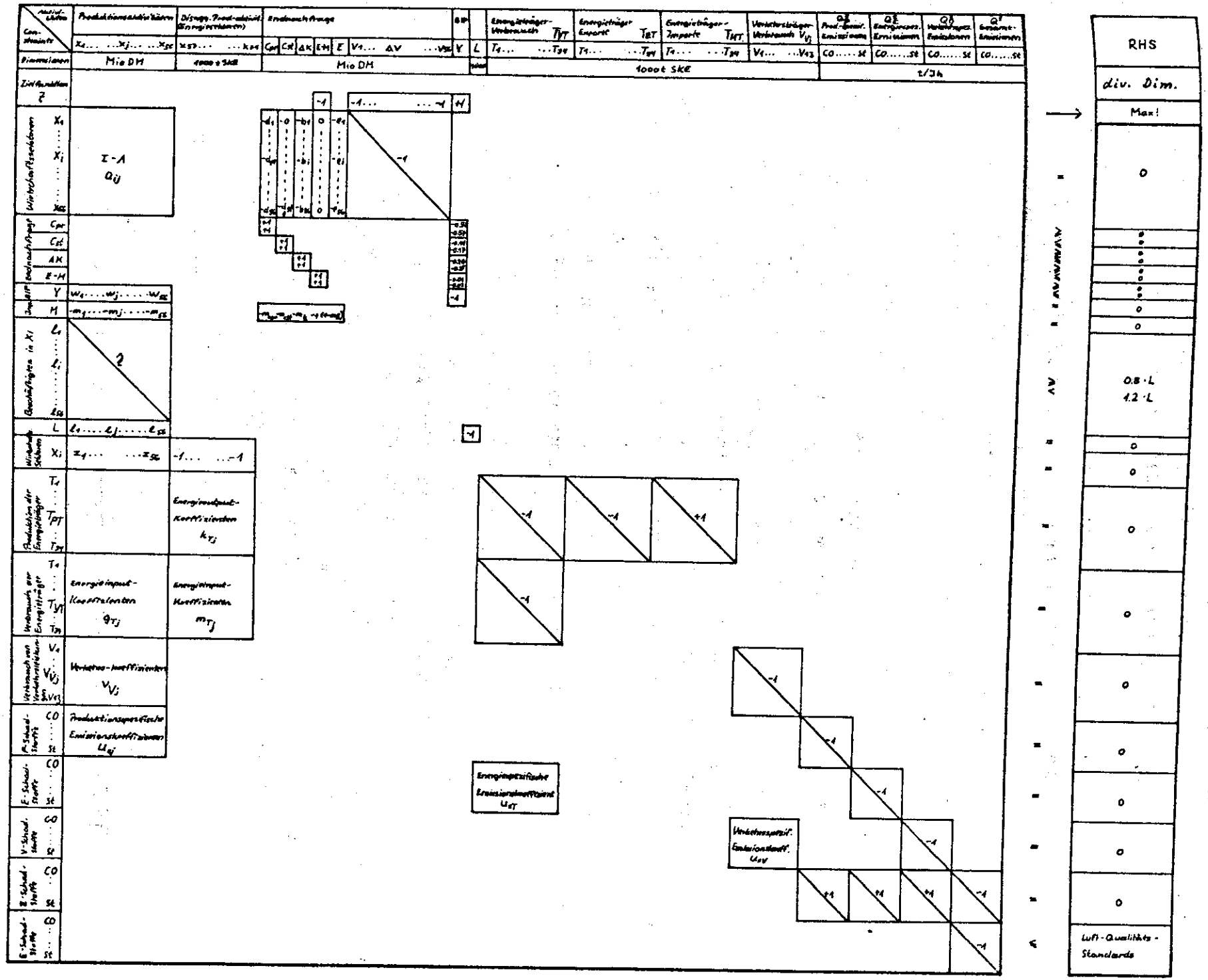


Schaubild 1: Restriktionsmatrix des Abgasmodells einer Region.

aggregation gelegt werden soll. Auf diesem Wege werden die Quellen der Umweltbelastung analysiert und in den interdependenten Zusammenhang mit ihrer ökonomischen Umwelt gestellt.

Die Optimierung der volkswirtschaftlichen Endnachfrage sowie der Produktions-, der Energie- und der Verkehrsaktivitäten erfolgt unter bestimmten Nebendingungen (Luftqualitätsstandards, Minimumstandards, Kapazitätsrestriktionen). In der Terminologie der quantitativen Wirtschaftspolitik zeigt sich das Problem als eine Optimierung mit flexiblen Zielen, wobei die Randbedingungen einseitig flexibel (kleiner oder größer gleich) sind.

2 Aktivitäten

Die Aktivitäten des Entscheidungsmodells sind so definiert, daß sie die Probleme der Luftbelastung vollständig erfassen. Das Tableau zeigt diese Aktivitäten in den entsprechenden Spalten (vgl. Kopfzeile der Restriktionsmatrix, Schaubild 1) und verdeutlicht durch das System von Gleichungen und Ungleichungen in den jeweiligen Zeilen, daß Güsimultan die "goods" (volkswirtschaftlich nachgefragte Güter und Dienste) und "bads" (Schadstoffe wie CO, CO_2, SO_2, NO_x...) - unter den jeweiligen Randbedingungen (maximale Luftqualitätsstandards) - bestimmt werden.

In den ersten 74 Spalten sind die Produktionsaktivitäten aufgeführt. Die ersten 56 Spalten enthalten die von dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung in der Input-Output-Rechnung für die BRD enthaltenen Wirtschaftssektoren. Diese "DIW-Matrix" geht in das Modell ein, um die ökonomischen Interdependenzen zwischen den Produktionssektoren beschreiben zu können[1].

1) Vgl. R. Stäglin, H. Wessels, Input-Output-Tabellen für die BRD 1966, in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung, Berlin 1971, S.215 - 220.

In den nachfolgenden Spalten werden bestimmte in der DIW-Systematik aggregierte Wirtschaftsbereiche disaggregiert. Zum einen können dadurch die spezifischen Emissionskonstellationen einzelner Verursacher explizit erfaßt werden. Zum anderen ermöglicht die stärkere Unterteilung einzelner Produktionssektoren den Einbau einer modifizierten Energie- und Verkehrsbilanz in das Modell.

Einen Gesamtüberblick über die zu analysierenden Produktionsaktivitäten vermittelt die folgende Sektorengliederung:

Tabelle 1:

1 Landwirtschaft

2 Energiewirtschaft, Bergbau
- 2.1 Elektrizität
  - 2.1.1 Öffentliche Wärmekraftwerke
  - 2.1.2 Zechen- und Grubenkraftwerke
  - 2.1.3 Sonstige Industriewärmekraftwerke
  - 2.1.4 Kernkraftwerke
  - 2.1.5 Wasserkraftwerke
- 2.2 Gas- und Wasserwirtschaft
  - 2.2.1 Wassergewinnung
  - 2.2.2 Fernheizwerke
  - 2.2.3 Ortsgaswerke
- 2.3 Kohlenbergbau
  - 2.3.1 Steinkohlenbergbau und Kokerei
    - 2.3.1.1 Zechen und Hüttenkokereien
    - 2.3.1.2 Steinkohlenzechen, Steinkohlenbrikettfabriken
  - 2.3.2 Braunkohlenbergbau
    - 2.3.2.1 Braunkohlengruben
    - 2.3.2.2 Braunkohlenbrikettfabriken, Schwellenanlagen
    - 2.3.2.3 Pechkohlengruben, Sonstige Energieerzeuger
- 2.4 Eisenerzbergbau
- 2.5 Kalibergbau
- 2.6 Erdöl- und Erdgasgewinnung
  - 2.6.1 Erdölgewinnung
  - 2.6.2 Erdgasgewinnung
- 2.7 Restlicher Bergbau

3 Chemie, Steine und Erden

3.1 Chemische Industrie
- 3.1.1 Erzeugung und Verarbeitung von Chlor und Chlorwasserstoff
- 3.1.2 Erzeugung von Schwefel, Schwefeldioxyd und Schwefelsäure
- 3.1.3 Erzeugung von Salpetersäure
- 3.1.4 Erzeugung von Stickstoff-, Phosphor- und Kalidüngemittel
- 3.1.5 Erzeugung von Kunstharzen, Kunststoffen (incl. synthetische Fasern)
- 3.1.6 Gewinnung von Ruß

3.2 Mineralölverarbeitende Industrie (Raffinerien)

3.3 Kunststoffverarbeitende Industrie

3.4 Kautschukindustrie (Gummi- und asbestverarbeitende Industrie)

3.5 Steine und Erden (Zementwerke)

3.6 Feinkeramik

3.7 Glasindustrie

4 Eisen und Stahl, NE-Metalle

4.1 Eisenschaffende Industrie (Hochöfen)

4.2 Eisen-, Stahl- und Tempergießerei (EST-Gießereien) (Ferrolegierungen)

4.3 NE-Metallindustrie
- 4.3.1 Kupfererzhütten
- 4.3.2 Kupferschrotthütten
- 4.3.3 Zinkhütten
- 4.3.4 Bleihütten
- 4.3.5 Aluminiumhütten
- 4.3.6 Sonstige NE-Metallindustrie

4.4 Ziehereien und Kaltwalzwerke

4.5 Stahlverformung

5 Stahl-, Maschinen-, Fahrzeugbau

5.1 Stahlbau

5.2 Maschinenbau

5.3 Straßenbau

5.4 Luftfahrzeugbau

5.5 Schiffbau

6 Elektrotechnik, EBM

6.1 Elektrotechnik

6.2 Feinmechanik, Optik

6.3 Eisen-, Blech-, Metallwarenindustrie

6.4 MSSS-Industrie

7 Holz, Papier, Leder, Textilien
- 7.1 Holzverarbeitung
- 7.2 Holzverarbeitende Industrie
- 7.3 Zellstoff-, Papier-, Pappeerzeugung
- 7.4
  - 7.4.1 Papierverarbeitende Industrie
  - 7.4.2 Druckerei
- 7.5 Lederindustrie
- 7.6 Textilindustrie
- 7.7 Bekleidungsindustrie

8 Nahrungs- und Genußmittel
- 8.1 Mühlenindustrie
- 8.2 Ölmühlen-, Margarineindustrie
- 8.3 Zuckerindustrie
- 8.4 Brauerei, Mälzerei
- 8.5 Tabakverarbeitende Industrie
- 8.6 Sonstige N. u. G.

9 Baugewerbe

10 Handel
- 10.1 Großhandel
- 10.2 Einzelhandel

11 Verkehr
- 11.1 Eisenbahn
- 11.2 Schiffahrt
- 11.3 Übriger Verkehr
  - 11.3.1 Landverkehr
  - 11.3.2 Luftverkehr
- 11.4 Post

12 Sonstige Dienste

13 Öffentliche Einrichtungen
- 13.1 Kläranlagen
- 13.2 Müllverbrennung
- 13.3 Müllkompostierung
- 13.4 Mülldeponie
- 13.5 Sonstige öffentliche Einrichtungen

14 Haushalte und Kleinverbraucher (Handwerk)

Die Disaggregation der Energiekosten ist im Hinblick auf die erarbeitete modifizierte Energiebilanz dergestalt vorgenommen worden, daß die Energieträger in der Gewinnungs- bzw. Umwandlungsstife und in der Verbrauchsstufe vollständig erfaßt werden können.

Die explizite Erfassung der Energieträgerstruktur ist die Voraussetzung der Lokalisierung der Abgasbelastung der gesamten Energiewirtschaft sowie einzelner Energieträger und somit Basis rationaler energiepolitischer Umweltstrategien.

Zum einen werden neben den volkswirtschaftlich erwünschten Energieträgermengen, "goods", die emittierten energiespezifischen Schadstoffe, "bads", ausgewiesen, so daß ein Vergleich der Energieträger untereinander hinsichtlich der ökologischen Belastung möglich ist. Zum anderen bilden die gewonnenen Informationen Ansatzpunkte für eine gezielte Substitution umweltbelastender Energieträger, deren Auswirkungen simuliert und verdeutlicht werden können. Darüber hinaus läßt sich zeigen, inwieweit der volkswirtschaftliche Wachstumsprozeß bei alternativen Energieträgerkonstellationen und Berücksichtigung fixierter Luftqualitätsstandards zu forcieren ist, so daß als Ergebnis eine "umweltfreundliche" Energieträgerstruktur aufgezeigt werden kann.

Den politischen Entscheidungsträgern bieten sich Orientierungshilfen, um den Entscheidungsprozeß hinsichtlich der Auswahl langfristiger umwelt- und insbesondere energiepolitischer Strategien und Konzeptionen zu rationalisieren.

Nachfolgende Energieträger sind über die angesprochene modifizierte Energiebilanz in das Entscheidungsmodell eingegangen:

Tabelle 2: Gliederung der Energieträger

1. Strom
2. Fernwärme
3. Kokerei-Stadt-Gruben-Klärgas
4. Gichtgas
5. Erdgas
6. Erdölgas
7. Raffineriegas
8. Flüssiggas
9. Erdöl (roh)
10. Motorenbenzin
11. Flugbenzin
12. Rohbenzin
13. Petroleum
14. Flugturbinenkraftstoff
15. Dieselkraftstoff
16. Heizöl (L)
17. Heizöl (S)
18. Petrolkoks
19. Andere Mineralölprodukte
20. Klärschlamm
21. Brenntorf
22. Brennholz
23. Steinkohle
24. Steinkohlenkoks
25. Steinkohlenbriketts
26. Rohteer, Pech
27. Andere Kohlenwertstoffe
28. Rohbenzol
29. Rohbraunkohle
30. Braunkohlenbriketts, Schwerkoks, Staub- und Trockenkohle
31. Hartbraunkohle
32. Pechkohle
33. Kernenergie
34. Wasserkraft

Eine modifizierte Verkehrsbilanz wird in das Entscheidungsmodell integriert, um den sektorspezifischen Verbrauch von Verkehrsleistungen und die daraus resultierenden Umweltbelastungen analysieren und aufzeigen zu können.

Die Entscheidungsstruktur ermöglicht die Situation verkehrspolitischer Stragegien durch die explizite Erfassung nachfolgender Verkehrsträger:

Tabelle 3: Verkehrsträger

I. Eisenbahnen
   1. Güterverkehr
   2. Personenverkehr

II. Schiffahrt
   (Binnenschiffahrt nur Güterverkehr)

III. Übriger Verkehr
   1. Straßenverkehr
      11. Güterverkehr (Fernverkehr)
      12. Güternahverkehr
      13. Sonstiger Verkehr
   2. Personenverkehr
      21. PKW (Individualverkehr)
      22. Straßenbahnen
      23. Obusverkehr
      24. Omnibusverkehr
      25. Stadtschnellbahnen
   3. Luftverkehr
      31. Frachten
      32. Personen

Zu den weiteren Aktivitäten zählen privater und staatlicher Konsum (C_{pr} bzw. C_{St}), private und öffentliche Investitionen (ΔK) Exporte (E), Importe (M), Lagerveränderungen (ΔV) sowie die Schadstoffaktivitäten, die gesondert als "bads" der Energie-, Verkehrs- und Produktionsprozeßaktivitäten und als deren Gesamtsumme ausgewiesen werden für folgende acht Schadstoffe:

Tabelle 4

Kohlenmonoxyd	(CO)
Kohlendioxyd	(CO_2)
Kohlenwasserstoffe	(C_xH_x)
Schwefeldioxyd	(SO_2)
Stickoxyde	(NO_x)
Fluorverbindungen	(F_x-, HF)
Chlorverbindungen	(Cl_x-, HCl)
Stäube	(St)

Die in der Kopfzeile des Tableaus enthaltenen Aktivitäten werden simultan mit der Bestimmung der Zielvariablen durch eine im folgenden zu erläuternde Verknüpfung aller Aktivitäten festgelegt.

3 Constraints

Die Zeilen des Tableaus erfassen die Bedingungen, denen alle umweltbeeinflussenden Aktivitäten der Region zu genügen haben. Graphisch sind diese Restriktionen als ein System von Gleichungen und Ungleichungen dargestellt, deren Konkretisierung sich dadurch ergibt, daß die innerhalb der Kästchen stehenden numerischen Koeffizienten mit den zu suchenden Aktivitätsniveaus multipliziert werden.

Dieses System beschreibt das ökonometrische Modell durch einen Satz quantifizierter Beziehungen zwischen den Variablen und spiegelt ein vereinfachtes Abbild des ökonomischen und ökologischen Ablaufs wieder.

Durch die Input-Output-Matrix, die die Interdependenzen zwischen den Wirtschaftssektoren beschreibt, sind 56 Produktionsgleichgewichte definiert, die als Restriktionen allgemein formuliert werden können:

$$(1) \quad X_1 = \sum_{j=1}^{56} a_{ij} \cdot X_j + d_{ipr} \cdot C_{pr} + d_{iSt} \cdot C_{St} + b_i \cdot \Delta K + e_i \cdot E \pm \Delta V_i \qquad (i = 1,\ldots,56)$$

In dieser Gleichung stellen X_j die Produktionswerte, a_{ij} die Input-Koeffizienten der j Sektoren, d_i und b_i konstante Faktoren, die den jeweiligen Anteil des Konsums bzw. der Investitionen an der sektoralen Produktion widergeben, C_{pr} bzw. C_{St} privater bzw. öffentlicher Konsum, ΔK private und öffentliche Investitionen, E Exporte, M Importe und ΔV_i Vorratsveränderungen der Sektoren i dar.

Neben diesen Produktionsgleichgewichten sind weitere Verhaltens- und Definitionsgleichungen eingeführt worden, die den ökonomischen Teil des Modells beschreiben:

Für den privaten bzw. öffentlichen Konsum gelten:

(2) $0{,}54\ Y \leq C_{pr} \leq 0{,}57\ Y$ bzw.

(3) $0{,}14\ Y \leq C_{St} \leq 0{,}17\ Y$.

Die privaten und öffentlichen Investitionen (4) sowie die Exportüberschüsse (5) unterliegen den Bedingungen:

(4) $0{,}26\ Y \leq \Delta K \leq 0{,}29\ Y$ und

(5) $0{,}014\ Y \leq E\text{-}M \leq 0{,}02\ Y$.

Das Bruttoinlandsprodukt (Y) ist definiert:

(6) $$Y = \sum_{j=1}^{56} w_j \cdot X_j \ .$$

Weiterhin gilt die Importfunktion

(7) $$M = \sum_{j=1}^{56} m_j \cdot X_j + m_{cpr} \cdot C_{pr} + m_{cSt} \cdot C_{St} + m_K \cdot \Delta K \ .$$

Der Arbeitseinsatz in den Sektoren unterliegt der Restriktion:

(8) $$1{,}2\ L_i \geq l_i X_i \geq 0{,}8\ L_i \qquad (i = 1,\ldots,56)$$

Das bedeutet, daß die Fluktuation der Beschäftigten zwischen den Sektoren dadurch limitiert wird, daß die Veränderung der Beschäftigten in jedem Sektor lediglich ± 20 v.H. des Arbeitseinsatzes von 1970 (L) betragen darf.

Die Disaggregationsmatrix wurde eingeführt, um eine Beziehung zu definieren zwischen den in Mio. DM gemessenen Bruttoproduktionswerten der Sektoren i und den in 1000 t SKE gemessenen Outputs und Inputs der disaggregierten Energiesektoren.

Die Definitionsgleichung lautet:

$$(9) \quad X_j[\frac{SKE}{Jh}] = \sum_i z_i \, [\frac{SKE}{DM}] \cdot X_i[\frac{DM}{Jh}] \qquad \begin{matrix}(i = 1,\ldots,56)\\(j = 57,\ldots,74)\end{matrix}$$

Für die Produktion der <u>Energieträger</u> T (T=1,...,34) gilt:

$$(10) \quad T_{PT} = \sum_{j=57}^{74} k_{Tj} \cdot X_j \, ,$$

wobei k_{Tj} den jeweiligen Anteil des Energieträgers T an dem gesamten Energieoutput X_j des entsprechenden Sektors j angibt.

Der <u>Verbrauch der Energieträger T</u> ist zum einen abzuleiten aus der Energieproduktion (10), den Energieträgerimporten (T_{MT}) und den Energieträgerexporten (T_{ET}). Die Vorratsveränderungen werden vorerst vernachlässigt.

$$(11) \quad T_{VT} = \sum_{j=57}^{74} k_{Tj} \cdot X_j + T_{MT} - T_{ET}$$

Aus Gleichung (9) ist zu ersehen, daß die Energieproduktion eine abhängige Variable der Bruttoproduktionswerte (X_i) der Sektoren i ist. Durch Einsetzen von (9) in (11) wird der Verbrauch der Energieträger T als eine Funktion der Bruttoproduktionswerte der Sektoren unter Berücksichtigung der Energieimporte und -exporte beschrieben:

$$(12) \quad T_{VT} = \sum_{j=57}^{74} \sum_i k_{Tj} \cdot Z_i \cdot X_i + T_{MT} - T_{ET} \; ; \qquad (i = 1,\ldots,56)$$

Zum anderen wird der Verbrauch der Energieträger T_{VT} (T=1,...,34) in den jeweiligen Sektoren j (j=1,...,74) definiert durch die Gleichung:

$$(13) \quad T_{VT} = \sum_{j=1}^{56} g_{Tj} \cdot X_j + \sum_{j=57}^{74} m_{Tj} \cdot X_j \qquad (T= 1,\ldots,34),$$

wobei g_{Tj} die verbrauchten Energieträger T (T=1,...,34) in den Sektoren j (j=1,...,56) pro 1 Mio. DM und m_{Tj} die verbrauchten Energieträger T (T=1,...,34) in den Sektoren j (j=57,...,74) pro 1000 t SKE des Outputs angeben.

Die Berechnung der Koeffizienten des Energieoutputs (k_{Tj}), des Energieverbrauchs zur Unterstützung des eigentlichen Produktionsprozesses (g_{Tj}) und des Energieverbrauchs für die Energieproduktion (m_{Tj}) erfolgte aus den Daten der Energiebilanz (vgl. Submodell "Energie") und den Bruttoproduktionswerten der Sektoren. Alle Werte beziehen sich auf das Jahr 1970, die Bruttoproduktionswerte sind berechnet in Preisen von 1962.

Die Berechnung und Aufnahme der Koeffizienten des Verkehrsbedarfs (v_{Vj}) in das Submodell "Abgase" erfolgt, sobald die Verkehrsbilanzen erstellt worden sind (vgl. Submodell "Verkehr").

Die Gleichung (14) erfaßt die von den Sektoren j (j=1,...,56) gewünschten Verkehrsleistungen V (V=1,...,13)

$$(14) \qquad V_V = \sum_{j=1}^{56} v_{Vj} \cdot X_j ,$$

wobei v_{Vj} den Bedarf an Verkehrsleistungen V (V=1,...,13) der Sektoren j (j=1,...,56) in t/km pro Mio. DM angibt.

Als vorläufig letzter Bestandteil der vorliegenden Restriktionsmatrix ist der für das Submodell Abgase interessanteste Komplex zu erläutern.

Die oben beschriebenen Aktivitäten zur Produktion wirtschaftlicher Güter und Dienste bewirken - unter den aufgezeigten Restriktionen - simultan eine <u>Belastung des Naturhaushaltes</u> durch die Erzeugung der luftverunreinigenden Schadstoffe. Diese unerwünschten Kuppelprodukte sind einerseits zur besseren Lokalisierung der Verursachergruppen in gesonderten Teilkomplexen jeweils für Produktionsaktivitäten (zur Produktion wirtschaftlicher Güter) für Energieaktivitäten und für Verkehrsaktivitäten erfaßt.

Andererseits wird die Gesamtbelastung der Region ermittelt, die kleiner/gleich vorgegebenen Luftqualitätsnormen zu sein hat.

Die Koeffizienten der Schadstoffe aus den Energieaktivitäten (u_{sT}). den Verkehrsaktivitäten (u_{sV}) und den Produktionsaktivitäten (u_{sj}) wurden berechnet als konstante Quotienten der entsprechenden Bruttoproduktionswerte der emittierenden Sektoren j bzw. der verbrauchten Energie- und Verkehrsaktivitäten.

Den Berechnungen wurden Emissionsquoten (in kg/t mengenmäßiger Output) zugrunde gelegt, die aus jüngsten Veröffentlichungen und Fachgesprächen mit Vertretern der Industrie, der Gewerbeaufsichtsämter und des Vereins Deutscher Ingenieure gewonnen und abgestimmt wurden. Über die Multiplikation der Emissionsquoten (z.B. x-kg SO_2 pro t erzeugter Stahl) mit den mengenmäßigen Outputs (x-kg SO_2 pro t Stahl · y - t Stahlerzeugung 1970 = Emission von SO_2) und der Division dieses Produktes durch den Bruttoproduktionswert des emittierenden Sektors (Emissionen SO_2 pro X Eisenindustrie) sind die Schadstoffkoeffizienten in t pro Mio. DM gewonnen worden. Die Umrechnung der mengenmäßigen Emissionskoeffizienten in 'wertmäßige' stellt die Beziehung zwischen der erwünschten Produktion von Gütern und Diensten und den unerwünschten Kuppelprodukten direkt her.

Der Energieverbrauch und der Verkehrsbedarf sind jeweils als Funktion der Bruttoproduktionswerte der Sektoren definiert (vgl. (9) bis (13) und (14)). Bei entsprechenden Multiplikationen mit den Koeffizienten der Schadstoffe aus den Energieaktivitäten (berechnet als Emissionen pro 1000 t SKE) bzw. aus den Verkehrsaktivitäten (Emissionen pro 1000 t SKE) sind die Emissionsaktivitäten bestimmt. Das beschriebene Gleichungssystem definiert die Schadstoffmengen (Q^s; s = 1,...,8) als Funktion der Bruttoproduktionswerte (X_i), so daß durch das Optimierungsmodell die "goods" und die "bads" simultan bestimmt werden können.

Der oben beschriebene Schadstoffkatalog läßt sich jederzeit um weitere Schadstoffe erweitern, sofern andere umweltfeindliche Substanzen erkannt bzw. quantifizierbar geworden sind.

Die skizzierten Aufbereitungen der Emissionswerte in Emissionskoeffizienten ermöglicht die Formulierung der Schadstoffgleichgewichte für die Energieaktivitäten:

$$(15) \quad Q_T^s = \sum_{T=1}^{34} u_{sT} \cdot T_{VT} \qquad (s = 1,\ldots,8)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen (13), (10) und (9):

$$(15a) \quad Q_T^s = \sum_{T=1}^{34} \sum_{j=1}^{56} u_{sT} \cdot g_{Tj} \cdot X_j + \sum_{T=1}^{34} \sum_{j=57}^{74} u_{sT} \cdot m_{Tj} \cdot X_j \qquad (s = 1,\ldots,8)$$

Für die Verkehrsaktivitäten ergeben sich die Schadstoffgleichgewichte

$$(16) \quad Q_V^s = \sum_{V=1}^{13} \sum_{j=1}^{56} u_{sV} \cdot v_{Vj} \cdot X_j \qquad (s = 1,\ldots,8)$$

Die Schadstoffgleichgewichte für die Aktivitäten zur Produktion von Gütern und Diensten lauten:

$$(17) \quad Q_P^s = \sum_{j=1}^{56} u_{sj} \cdot X_j \qquad (s = 1,\ldots,8)$$

Die Summe der Schadstoffe aller Aktivitäten hat der Randbedingung zu genügen:

$$(18) \quad Q^s \leq Q_{max}^s \quad \text{oder unter}$$

Berücksichtigung von (15) - (17)

$$(18) \quad Q_T^s + Q_V^s + Q_P^s \leq Q^s \qquad (s = 1,\ldots,8)$$

Die in dem Schaubild 1 explizit enthaltenen umweltbeeinflussenden Aktivitäten sowie deren Restriktionen wurden beschrieben. In dem Optimierungsmodell sind darüber hinaus noch Entsorgungsaktivitäten durch die Wahl der Emissionskoeffizienten implizit enthalten. Die technischen Emissionskoeffizienten sind so gewählt, daß sie nicht die insgesamt produzierten Schadstoffmengen, sondern lediglich die an die Lufthülle abgegebenen erfassen.

Somit repräsentiert jeder Emissionskoeffizient eine bestimmte Produktionstechnik sowie bestimmte Entsorgungsaktivitäten, die Schadstoffe vernichten, entgiften, vermindern und/oder in den Produktionsprozeß zurückzuführen. Zu beachten bleibt, daß bestimmte Entsorgungsaktivitäten die Belastung der Luft auf Kosten z.B. der Belastung der Belastung der Abwässer (z.B. bei der "Wäsche" giftiger Schadstoffe in der chemischen Industrie) verhindern.

Diese Interdependenzen werden in dem integrierten Umweltplanungsmodell erfaßt.

4 Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse des Submodells Abgase sind in der Restriktionsmatrix (vgl. Schaubild 1) dargestellt und im folgenden beschrieben worden.

Im Anschluß an die Erarbeitung und Aufbereitung des Zahlenmaterials sind die Daten entsprechend der Modellstruktur programmiert und zahlreiche Testläufe auf der Rechenanlage der Universität Münster durchgeführt worden.

Die Zwischenergebnisse sind keineswegs so zu interpretieren, daß sie absolute Aussagen für die Fixierung politischer Luftqualitätsnormen beinhalten. Sicherlich werden sie aber bereits erste wichtige Hinweise vermitteln und die Basis für spätere politische Entscheidungen über die Höhe dieser festzulegenden Normen durch die Explikation ökonomischer und ökologischer Interdependenzen rationalisieren.

Eine Regionalisierung wird ermöglichen, für jede Region unterschiedliche Standards zu setzen. Die Höhe wird maßgeblich von den in der Region vorherrschenden Bedingungen wie Emissionsmodus (Temperatur und Menge der Abgase, Höhe

und Geometrie der Quellen), meteorologische Bedingungen (Windgeschwindigkeit, Turbulenz, Lufttemperatur) und Topographie bestimmt.

Die regional unterschiedlichen natürlichen Verdünnungsbeiträge der Atmosphäre sowie die räumlichen Besonderheiten können dadurch berücksichtigt werden, daß für jede Region mit Hilfe mathematisch-meteorologischer Ausbreitungsmodelle, ausgehend von den gewünschten oder gesetzlich vorgeschriebenen Normen (z.B. MIK), die zulässigen Emissionsstandards berechnet und vorgegeben werden.

Eine Dynamisierung des Modells wird zeitlich vertikale Interdependenzen ökonomischer und ökologischer Art sowie politischer Entscheidungen aufzeigen können.

Verzeichnis der Symbole

Y = Bruttoinlandsprodukt

X_i = Bruttoproduktionswert des Sektors i (i=1,...,56)

I = Einheitsmatrix

Q^s = Menge des Schadstoffes s in t pro Jahr (s=1,...,8)

t = Tonnen

s = Schadstoffe (s=1,...,8)

A = Matrix der Inputkoeffizienten

a_{ij} = Input-Koeffizienten der Sektoren i

d_{pr} = Anteil des privaten Konsums an der sektoralen Produktion

d_{St} = Anteil des staatlichen Konsums an der sektoralen Produktion

e = Anteile des Außenhandels an der sektoralen Produktion

C_{pr} = privater Konsum

C_{St} = Öffentlicher Konsum

ΔK = private und öffentliche Investitionen

E_i = Exporte der Sektoren i

M_i = Importe der Sektoren i

ΔV_i = Vorratsveränderungen der Sektoren i

w_j = Wertschöpfung (Beitrag der Sektoren j zum Bruttoinlandsprodukt)

m_j = Importquoten der Sektoren j (j=1,...,56)

m_c = Importquote für privaten (m_{pr}) und staatlichen Konsum

m_K = Importquote für private und öffentliche Investitionen

L = Beschäftigte in den Sektoren im Jahre 1970

A = Durch das Modell zu bestimmende Beschäftigten in der BRD

l_i = Beschäftigtenkoeffizient des Sektors i

z_i = produzierte Energie pro Bruttoproduktionswert der Sektoren i in 1000 t SKE pro Mio. DM

X_j = Energieproduktion in 1000 t SKE pro Jh (Σ aller Energieträger in 1000 t SKE pro Jh) (j=57,...,74)

T_{PT} = Produktion der Energieträger T (T=1,...,34)

k_{tj} = Anteil des Energieträgers T an dem gesamten Energieoutput in Sektor j

T_{VT} = Energieträgerverbrauch

T_{MT} = Importe der Energieträger T (T=1,...,34)

T_{ET} = Exporte der Energieträger T (T=1,...,34)

g_{Tj} = eingesetzte Energieträger T im Sektor j pro 1 Mio.DM (T=1,...,34; j=1,...,56)

m_{Tj} = eingesetzte Energieträger T im Sektor j pro 1000 SKE Output (T=1,...,34; j=57,...,74)

V_V = Gesamter Verkehrsbedarf an Verkehrsleistungen V (V=1,...,13)

v_{Vj} = Bedarf an Verkehrsleistungen V (V=1,...,13) der Sektoren j (j=1,...,56) in 1000 t SKE pro Mio.DM

Q_T^s = Schadstoffmengen aus Energieträgerproduktions- und -verbrauchsaktivitäten in t pro Jahr

Q_T^s = Schadstoffmengen aus Verkehrsaktivitäten in t pro Jahr

Q_P^s = Schadstoffmenge aus Produktionsaktivitäten in t pro Jahr

u_{sT} = Schadstoffkoeffizienten s (s=1,...,8) des Energieträgerverbrauchs T (T=1,...,34)

u_{sV} = Schadstoffkoeffizienten s (s=1,...,8) der Verkehrsaktivitäten V (V=1,...,13)

u_{sj} = Schadstoffkoeffizienten s (s=1,...,8) der Produktionsprozeßaktivitäten j (j=1,...,56)

Peter Kessel

Reisemittelwahl - Zwänge, Meinungen, Motive und Determinanten

1 Zielkonflikt der urbanen Gesellschaft

Wenn heute in Fachkreisen und in der Öffentlichkeit die Sorgen, Nöte, Probleme und Aufgaben des Verkehrsstädtebaus diskutiert werden, so bildet die Reisemittelwahl, d.h. die Aufteilung der Verkehrsarbeit auf die individuellen und öffentlichen Verkehrsmittel in aller Regel das zentrale und beherrschende Thema. Hierzu werden heute eine Vielzahl von Meinungen, Denkansätzen und Lösungen angeboten, die naturgemäß ein weites Spannungsfeld beschreiben und von der Forderung nach der autogerechten Stadt bis hin zur Mode gewordenen Verteufelung und Diskriminierung des privaten Autos reichen, das derzeit permanent auf der Anklagebank sitzt und dem man nur allzu gern die Alleinschuld an der vorhandenen Verkehrsmisere anlasten möchte.

An dieser Stelle soll die Vielzahl der Meinungen nicht durch eigene Lösungsvorschläge vermehrt werden, hier mag der Hinweis genügen, daß zumindest die beiden Extreme wenig real sind: Die autogerechte Stadt wird hier in Deutschland in Zukunft sicherlich nicht mehr machbar sein und wird wohl auch immer seltener und mit immer geringerer Ernsthaftigkeit gefordert. Die weitgehende Abschaffung des Autos aber ist sicherlich ebenso irreal; dies wäre nämlich gleichbedeutend mit einer Planungsdiktatur, in deren Verlauf der Bevölkerung dann irgendwelche Ideologien aufgezwungen werden müßten, die von ihr aber alles andere als gewünscht würden. Aufgrund vorliegender Untersuchungen haben wir einfach davon auszugehen, daß selbst in hochverdichteten und durch öffentliche Verkehrsmittel heute bereits ausgezeichnet erschlossenen Innenstadtbereichen wie etwa der City von Hamburg dem Auto eine Funktion zukommt, die derzeit einfach nicht austauschbar ist;

umso mehr werden wir uns in Mittelstädten wie Aachen, Kiel, Münster oder Freiburg darauf einzustellen haben, auch in Zukunft mit dem Auto zu leben; auf dem flachen Lande ist und bleibt der PKW auch in Zukunft Verkehrsgelegenheit schlechthin.

Wie zuvor bereits erläutert, will ich im Rahmen dieses Referates keine Lösungen und Rezepte zur Verbesserung des "Gleichgewichtszustandes" zwischen individuellem Straßenverkehr und öffentlichem Linienverkehr anbieten und vorstellen. Dennoch seien die wesentlichen Prämissen genannt, die für eine erfolgversprechende Planung und Steuerung der Reisemittelwahl zwingende Voraussetzung sind.

Die erste Prämisse zielt auf eine Änderung der städtebaulichen Randbedingungen hin. Hier ist derzeit immer noch die anhaltende Tendenz einer zentrifugalen Einwohnerbewegung zu beobachten, die einhergeht mit einer immer einseitiger werdenden Verdichtung der Kernbereiche durch tertiäre Dienste. Eine Änderung der Bodenpreispolitik und eine Wiederbelebung der Kernzonen durch Einwohner könnten fraglos einen ersten Beitrag für eine sinnvolle Minimierung der vorhandenen Verkehrsintensitäten liefern.

Die zweite Prämisse zielt auf eine spürbare Verbesserung der Attraktivität öffentlicher Verkehrsmittel und somit auf die Schaffung einer echten Alternative zum Auto hin. Das bedeutet in den Ballungszentren einerseits konkret den Ausbau und die Ergänzung der teilweise bereits vorhandenen und der geplanten Schnellbahnsysteme, darüber hinaus aber auch die Ausschöpfung aller organisatorischer Möglichkeiten, wie sie etwa durch die Verbundbildung auf der Seite der Verkehrsträger, durch gleitende Arbeitszeit und eine Änderung des Ladenschlußgesetzes auf seiten der Verkehrsverursacher möglich sind.

Die dritte und vielleicht wichtigste Prämisse besagt schließlich, daß wir es uns gar nicht leisten können, an den Präferenzen und Verhaltensnormen der Bevölkerung vor-

beizuplanen. Hier müssen wir aber eingestehen, daß der Hang und das Streben zum Auto durchaus Verhaltensnorm sind, daß die Motorisierung noch weiter fortschreiten wird und daß wir das Auto zum derzeitigen Zeitpunkt weder rückerfinden noch durch irgendein anderes, völlig gleichwertiges Verkehrsmittel ersetzen können. Diese Verhaltensnorm kann ohne Frage auch in einer Demokratie wie der unseren durch dirigistische Eingriffe modifiziert werden, umkehrbar ist sie aber mit Sicherheit nicht. Über diesen Sachverhalt sollten auch Meinungsumfragen nicht hinwegtäuschen, die meist sehr stark vom Wohlverhalten geprägt werden. Die Notwendigkeit öffentlicher Verkehrsmittel wird hierbei fraglos von allen konzediert, dennoch fährt man konsequent auch weiterhin mit dem Auto.

Solche Verhaltensweisen lassen den Zielkonflikt, in dem sich die urbane Gesellschaft derzeit befindet, am deutlichsten werden: Die mit dem Auto nun einmal zwangsläufig verbundenen Umweltbelästigungen und ernsthaften Schädigungen werden heute weder von den Autofahrern selbst noch von den Interessenverbänden der Automobilindustrie in Abrede gestellt, dennoch lassen wir uns durch die städtebaulichen Situationen und durch das Fehlen einer gleichwertigen Alternative im Bereich der öffentlichen Verkehrsmittel zu einer immer stärkeren Motorisierung provozieren. Die Einschränkung dieser Motorisierung und die teilweise Aussperrung des Autos bedeuten in der Tat nicht die Lösung dieses Zielkonfliktes. Bei freier Zielwahl wäre das Ausweichen auf für das Auto sehr viel leichter zugängliche Attraktivitäten die Folge, was von niemandem ernsthaft gewollt wird.

Die folgenden Ausführungen befassen sich in diesem Sinne mit den Verhaltensweisen bei der Reisemittelwahl. Hierbei soll zunächst auf die Zwänge, auf die Meinungen und Motive der Verkehrsbevölkerung bei der Reisemittelwahl eingegangen werden. Schließlich sollen an ausgewählten Beispielen die Einflüsse der sozio-ökonomischen Struktur auf die Verhaltensweisen quantifiziert werden.

Solche Studien lassen sich derzeit in keiner deutschen Stadt besser durchführen als in Hamburg, das bereits seit langer Zeit ein vielschichtiges, attraktives und gut funktionierendes Angebot komplementärer Verkehrssysteme vorhält. Die im folgenden beschriebenen Ergebnisse stammen aus einer Untersuchung, die im Auftrage der Bundesregierung sowie der Freien und Hansestadt Hamburg in der Region Hamburg durchgeführt wurden.

2 Zwänge, Meinungen und Motive bei der Reisemittelwahl

In der Einleitung war bereits sinngemäß postuliert worden, daß eine realistische Prognose über die zukünftige Aufgabenteilung zwischen öffentlichen und individuellen Reisemitteln einerseits zwangsläufig an den verkehrspolitischen Notwendigkeiten und finanziellen Möglichkeiten zu orientieren sein wird, daß hierbei aber in keinem Falle die eingespielten Verhaltensmuster der Verkehrsbevölkerung, deren Präferenzen, Einstellungen, Meinungen und Motive unberücksichtigt bleiben können.

Bei der hier zugrundegelegten Verkehrsuntersuchung war den befragten Verkehrsteilnehmern im Rahmen einer Interviewerhebung die Möglichkeit gegeben worden, aus insgesamt 14 vorgegebenen Motiven das für die Reisemittelwahl jeweils bestimmende auszuwählen. Je Personenfahrt konnten hierbei maximal 3 Motive markiert werden, wobei die Reihenfolge der Markierung zugleich auch die Rangfolge des Motivs gemäß seiner Bedeutung für die betrachtete Reise angibt. Die 14 Motive lassen sich in erster Verallgemeinerung zu den 3 folgenden relevanten Gruppen zusammenfassen:

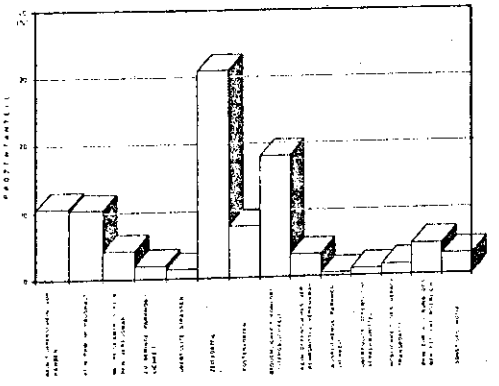
1. Motive, die aufgrund objektiver Zwänge (kein Führerschein vorhanden; kein PKW im Haushalt; bei Reisenantritt kein PKW verfügbar) bzw. aus mehr oder minder subjektiven Erfahrungen und Einstellungen heraus (über-

füllte Straßen; zu geringe Parkmöglichkeit) gegen die Benutzung des PKW als Reisemittel sprechen.

2. Motive, die auf die Konkurrenzsituation verschiedener Reisemittel hinzielen und zumindest theoretisch die Möglichkeit der Entscheidung, die Chance der Reisemittelwahl voraussetzen (Zeitvorteil; Kostenvorteil; Bequemlichkeit, Komfort, Sitzmöglichkeit).

3. Motive, die aufgrund objektiver Zwänge (kein öffentliches Verkehrsmittel verfügbar) bzw. aus mehr oder minder subjektiven Erfahrungen heraus (ausreichende Parkmöglichkeiten; überfüllte öffentliche Verkehrsmittel; Möglichkeit des Gepäcktransportes; PKW zur Ausübung des Berufes erforderlich) gegen die Benutzung öffentlicher Reisemittel sprechen.

HÄUFIGKEIT DER MOTIVE



Die prozentuale Aufteilung der Motivnennungen ist in der Abb.1 durch die Größe von Säulen veranschaulicht. Hiernach wurden bei nahezu der Hälfte aller Personenfahrten die "neutralen" Motive "Zeitvorteile" (31 %) und "Bequemlichkeit, Komfort, Sitzmöglichkeit" (18 %) als ausschlaggebend für die Wahl des Reisemittels angegeben. Das dritte Motiv der "neutralen" Gruppe, der "Kostenvorteil", spielt im Vergleich hierzu eine untergeordnete Rolle; er hat sich nach den vorliegenden Angaben nur in 8 von 100 Fällen entscheidend auf die Wahl des Verkehrsmittels ausgewirkt. Das ist, wie weitergehende Untersuchungen ergeben haben, darin begründet, daß generelle und nur perio-

disch anfallende Ausgaben wie etwa die Garagenmiete, die Kfz-Steuer und -versicherung die Meinungsbildung und das Kostenbewußtsein nur sehr wenig beeinflussen. Von einiger Bedeutung sind allenfalls noch diejenigen Kosten, die unmittelbar "aus der Tasche" bezahlt werden müssen. Dies sind Beispielsweise beim PKW die Ausgaben für Benzin, in erster Linie aber wohl die Fahrkosten bei den öffentlichen Reisemitteln, die meistenteils ja unmittelbar bei Fahrtantritt zu zahlen und auch konkreter meßbar sind als beim privaten Kfz. Dennoch wurden dem öffentlichen Reisemittel relativ doppelt so häufig Kostenvorteile zugestanden als dem PKW, was dem Individualverkehr im Hinblick auf die tatsächlich vorhandenen Kostenrelationen noch schmeicheln dürfte.

Der Hinweis schließlich, die Benutzer öffentlicher Verkehrsmittel seien zwangsläufig kostenbewußter als PKW-Besitzer, da sie sich aus wirtschaftlich schwächeren Gruppen rekrutieren, ist sicherlich nicht ganz von der Hand zu weisen. Die im Rahmen der Hamburger Untersuchung gefundenen Ergebnisse bestätigen zwar, daß "keineswegs nur Leite mit kleinem Einkommen" U- oder S-Bahn fahren. Dennoch lassen sich für den wirtschaftlichen Status und die Reisemittelwahl eindeutige Abhängigkeit nachweisen, wonach grob vereinfacht Haushalte mit unterdurchschnittlichem Einkommen vorwiegend mit öffentlichen Verkehrsmitteln, finanziell überdurchschnittlich gutgestellte Familien vorwiegend mit dem eigenen Auto fahren.

Faßt man die mehr oder minder quantifizierbaren und damit objektiv beschreibbaren Leistungskriterien "Zeitaufwand" und "Kosten" sowie die unter dem Begriff "Annehmlichkeit" subsumierten Merkmale Bequemlichkeit, Komfort, Sitzmöglichkeit und vieles andere mehr zusammen, so entfallen allein auf die Gruppe der neutralen Motive nahezu 60 % aller Angaben. Wenngleich "neutral", so steht dennoch außer Frage, daß bei dieser Motivgruppe die in der vorangestellten Definition apostrophierte

"Wahlchance" in der Realität keineswegs immer gegeben war.

Nach dem Zeit- und Annehmlichkeitsfaktor folgen in der Häufigkeit der Nennung bereits "objektive Zwänge" wie "fehlender Führerschein" (11 %), "fehlender PKW-Besitz" (10 %) oder "Nichtverfügbarkeit eines Kraftfahrzeuges", die zumindest die aktive Benutzung des PKW als Reisemittel ausschließen. Fügt man dieser Gruppe noch die Begründung "kein öffentliches Verkehrsmittel verfügbar" (3 %) hinzu, so sind nahezu 30 % aller Motivnennungen auf eine Personengruppe bezogen, für die ohnehin keine Wahlchance besteht. Die diesbezüglichen Ausführungen zu den neutralen Motiven sind hier sinngemäß zu übertragen; demnach dürfte die Gruppe der "Captive Riders", die entweder "Gefangene" öffentlicher oder aber individueller Reisemittel sein mögen, noch wesentlich über dem genannten Anteil von 30 % liegen. Die "neutralen" Motive spiegeln zwar alle subjektiven Präferenzen der Verkehrsteilnehmer wider und setzen daher im eigentlichen Sinne das Vorhandensein konkurrierender Verkehrsmittelangebote voraus, in Wirklichkeit ist jedoch die Möglichkeit der Wahl vielfach gar nicht gegeben.

Stellt man die Frage nach dem Stellenwert solcher Motive für die praktische Arbeit, so ist zunächst darauf hinzuweisen, daß die hier beschriebenen Motive ohnehin als Nebenprodukt im Rahmen einer breit angelegten Verkehrsuntersuchung mit anfielen. Natürlich ist man sich auch bewußt, daß die Motive der Reisemittelwahl im Einzelfall nur sehr bedingt in konkrete Planungsschritte umsetzbar sind. Dennoch wurden vorhandene Zwänge, Größenordnungen und Verhaltensnormen verdeutlicht, die die Sinnfälligkeit der bisherigen Modellrechnung auf der Basis von Zeitrelationen oder Zeitdifferenzen bestätigen und auch für die weitere Arbeit wichtige Hinweise liefern. So dürfte etwa die relative Geringschätzung des Kostenfaktors durch die Verkehrsteilnehmer klar gemacht haben, in welch geringem Maße verkehrspolitische Maßnahmen wie etwa die Anhebung der Benzinsteuer das Verkehrsverhalten beeinflussen können, es sei denn, daß durch die Häu-

fung der mit dem Kfz verbundenen Kosten schließlich irgendein noch zu bestimmender Schwellwert überschritten wird. In gleichem Sinne dürfte auch die Einführung eines Nulltarifes von kaum spürbarem Einfluß auf die Benutzerrelationen der öffentlichen Verkehrsmittel sein. Schließlich macht die beherrschende Rolle der "neutralen" Motive "Zeitvorteil" und "Bequemlichkeit" nur allzu deutlich, wo eine erfolgversprechende Attraktivitätssteigerung der öffentlichen Nahverkehrsmittel anzusetzen hat.

3 Sozio-ökonomische Determinanten der Reisemittelwahl

3.1 Überblick

Neben der "Erzeugung" des Verkehrsaufkommens und der "Verteilung" der Verkehrsströme auf die Quellen und Ziele im Raum bildet die "Reisemittelwahl" den dritten und heute fraglos am schwierigsten "handhabbaren" Arbeitsprozeß im Rahmen umfassender genereller Verkehrsuntersuchungen.

Dieser Prozeß wird heute in der Verkehrswissenschaft allgemein durch den anglo-amerikanischen Terminus "Modal-Split" umschrieben. Wenn im Rahmen dieses Referates in Abweichung hierzu fast ausschließlich der deutsche Begriff "Reisemittelwahl" verwandt wird, so ist der Unterschied keineswegs nur sprachlicher Natur und im Sinne der bisher gemachten Ausführungen durchaus gewollt: "Wahl" zielt eindeutig auf die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer und somit auf Verhaltensmuster der Bevölkerung ab, "Split" hingegen bezieht sich sehr viel abstrakter nur auf die Auswirkungen, die diese Entscheidungen auf die Aufteilung der Verkehrsarbeit haben.

Aus bereits vorliegenden Untersuchungen, insbesondere aus den in USA gesammelten Erfahrungen, läßt sich ableiten, daß die Reisemittelwahl im wesentlichen von vier Merkmalsgruppen beeinflußt und bestimmt wird.

1. Merkmale, die unmittelbar zu den Menschen (Reisepersonen) oder zumindest zu dem Haushalt, dem diese angehören, in Bezug stehen.

2. Faktoren, die die städtische Umwelt beschreiben und charakterisieren.

3. Einflußgrößen, die sich aus den system-spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Reisemittel herleiten.

4. Faktoren, die mit der Fahrt selbst, also etwa der Verkehrsstruktur oder dem Reisezweck in Zusammenhang stehen.

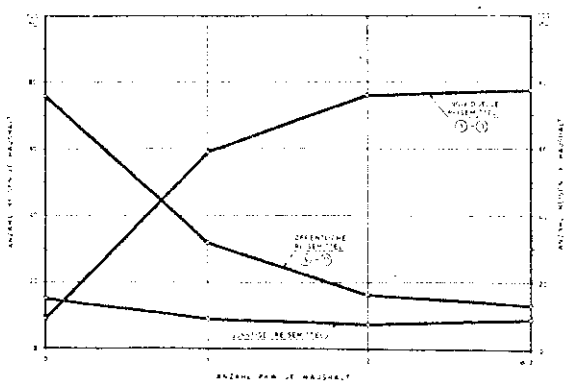
Die folgenden Ausführungen und Erläuterungen befassen sich mit sozio-ökonomischen Determinanten der Verkehrsmittelwahl und bleiben somit auf die erste Merkmalsgruppe beschränkt. Im Rahmen der hier zitierten Untersuchung für die Hansestadt Hamburg konnte nachgewiesen werden, daß die Haushaltsgröße, die Erwerbstätigkeit, der Führerscheinbesitz, das Bildungsniveau, der Motorisierungsgrad, das Alter und die Einkommensstruktur von Einfluß auf die Reisemittelwahl sind. Hier seien stellvertretend zwei Merkmale herausgegriffen und im folgenden näher beschrieben.

3.2 Einfluß des Motorisierungsgrades auf die Reisemittelwahl

Ganz ohne Frage ist das Merkmal "Kfz-Besitz" die relevanteste Maßzahl, um die Möglichkeiten eines Haushalts zu kennzeichnen, zu jeder Zeit mit einem Auto fahren und sich somit weitgehend individuell und unabhängig im Raum bewegen zu können; da der PKW das generell bevorzugte Reisemittel darstellt, wird Verkehrsgelegenheit vielfach sogar schlechthin als Funktion der verfügbaren Kfz interpretiert, wobei allerdings ein adäquates Straßennetz ohne wesentliche Verkehrsbehinderung als selbstverständlich vorauszusetzen ist.

Dennoch muß man sogleich einschränken, daß auch dieses Merkmal die genannten Möglichkeiten schließlich nur unvollkommen wiedergibt: Aufgrund der unterschiedlichen Verkehrswünsche der einzelnen Familienmitglieder wird das Fahrzeug meist nur einer Person zur Verfügung stehen oder aber es kann aus Altersgründen noch nicht oder nicht mehr benutzt werden.

REISEMITTELWAHL UND MOTORISIERUNG

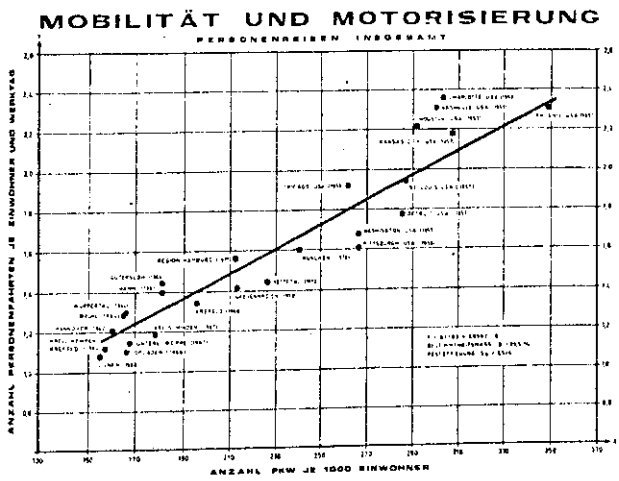


In Abb.2 ist die Verkehrsmittelwahl zur Motorisierung von Haushalten in Bezug gebracht, ohne daß hierbei zunächst die Einflüsse anderer Kriterien, die ihrerseits mit der Motorisierung zusammenhängen, eliminiert wurden. Hiernach schwankt der Anteil, der den PKW-Personenfahrten am gesamten werktäglichen Personenverkehr zukommt, zwischen etwa 10 % bei den nichtmotorisierten Haushalten und nahezu 80 % bei denjenigen Familien, die über drei und mehr Autos verfügen. Dieser Zuwachs verläuft allerdings erwartungsgemäß nicht linear, sondern wird mit ansteigender Motorisierung ständig geringer. Wenngleich Familien mit drei oder mehr PKW nur noch jede zehnte Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln durchführen, so kann doch offensichtlich selbst bei völlig abgesättigter Motorisierung keineswegs völlig auf den Kollektivverkehr als Sockelleistung verzichtet werden. Steht dem Haushalt aber nur ein PKW zur Verfügung, was bei der Gruppe der motorisierten Haushalte vorerst immer noch als Norm gelten darf, so bleibt dem öffentlichen

Verkehr ein Anteil von über 30 %, knapp 60 % entfallen auf den PKW und bei etwa 10 % der Fahrten weicht man auf sonstige Reisemittel aus.

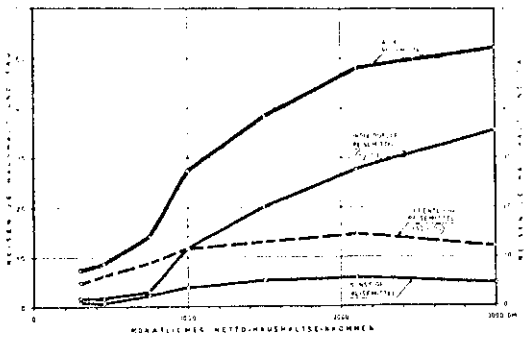
3.3 Einfluß der Einkommensstruktur auf die Reisemittelwahl

In vielen Literaturquellen wird heute auf die enge Kausalität zwischen dem Grad der Motorisierung und der Mobilität hingewiesen. In der Tat gilt denn auch als wahrscheinlich, daß mit steigendem PKW-Besitz die Gesamtzahl der Personenfahrten je Einwohner und Werktag, die heute in der Bundesrepublik im Mittel etwa bei 1,5 liegen dürfte, nach Absättigung der Motorisierung auf etwa 2,0 bis 2,4 Reisen anwächst.

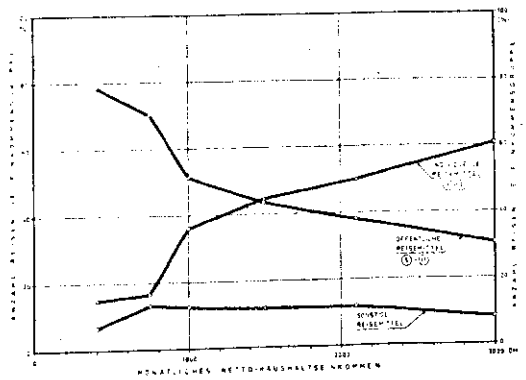


Allerdings sollte man hier nicht verkennen, daß die Ursachen für dieses Phänomen letztlich tiefer liegen. So hat sich denn auch in jüngerer Zeit immer stärker die Betrachtungsweise durchgesetzt, daß die Verdichtung des Kfz-Bestandes mit dem Wachstum des Sozialproduktes einhergeht und daß letztlich der wirtschaftliche Standard als Hauptbestimmungsgröße für eine gekoppelt auftretende Nachfrage nach Verkehrsleistungen und entsprechend nach Verkehrsmitteln gesehen werden muß.

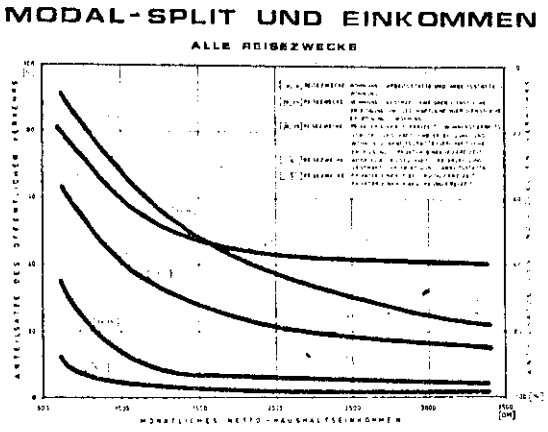
MOBILITÄT UND EINKOMMEN



REISEMITTELWAHL UND EINKOMMEN



Die Darstellung der Mobilität als Funktion des monatlichen Haushaltseinkommens in Abb.4 scheint die soeben angesprochenen Zusammenhänge und Abhängigkeiten in der Tendenz jedenfalls eindeutig zu bestätigen: Bei Haushalten mit sehr kleinem Einkommen ist die Mobilität extrem gering; Familien hingegen, die über ein monatliches Netto-Einkommen von 3.000,- DM und mehr verfügen, führen insgesamt je Werktag doppelt soviele Reisen durch wie die Gruppe der Haushalte mit Einkommen um 1.000,- DM. Diese Zunahme geht ausschließlich "zu Lasten" des individuellen Straßenverkehrs.



Die generellen Auswirkungen des Einkommens auf die Benutzung von Verkehrsmitteln ist in Abb.5 dargestellt: Die beiden für den individuellen und öffentlichen Verkehr aufgetragenen Kurven liefern das Bild von zwei Zangenflügeln, deren gemeinsamer Drehpunkt etwa bei 1.500,- DM Haushaltseinkommen liegt. Bis zu diesem Drehpunkt nähern sich die Benutzerrelationen, die bei den wirtschaftlich schwachen Gruppen zunächst eindeutig zum öffentlichen Verkehrsmittel tendieren, stetig einander an, hiernach verschieben sich dann die Anteilsätze mit steigendem Einkommen immer mehr zugunsten des privaten Kraftfahrzeugs. Aber auch in Haushalten mit sehr gutem Einkommen werden 35 % aller Personenfahrten mit öffentlichen Reisemitteln durchgeführt. Ein überzeugenderer Nachweis für die Notwendigkeit öffentlicher Reisemittel als feste Sockelleistung kann wohl kaum erbracht werden.

4 Ausblick

Die bisherigen Ausführungen und Darstellungen haben gezeigt, daß sich die Verhaltensweisen der Verkehrsbevölkerung bei der Reisemittelwahl mit zunehmender Motorisierung und mit

wachsendem Einkommen ändern werden. Daraus ergibt sich die zwingende Forderung, diese Tendenzen bei dem Aufbau von Verkehrsmodellen, mit deren Hilfe die zukünftigen Benutzerrelationen im individuellen und öffentlichen Verkehr eingeschätzt werden sollen, vollgültig zu berücksichtigen. Hierbei versteht es sich allerdings von selbst, daß die Prognose der Verkehrsmodelle nicht nur als reine Trendextrapolation der gemessenen und zuvor beschriebenen Verhaltensmuster gesehen werden darf, sondern daß auch andere Determinanten der zukünftigen Reisemittelwahl wie etwa die Parkplatzkapazitäten oder verkehrspolitische Vorgaben ausreichend Berücksichtigung finden. Dies ist jedoch bereits ein anderes Thema.

Hans-Günther Schmidt

Betrachtungen zur modellmäßigen Erfassung des interregionalen Güterverkehrs für die technische Planung

1. Aufgabenstellung
2. Grundlegende Vorarbeiten
   2.1 Aggregation der Variablen
   2.2 Erfassung und Einteilung des Planungsraumes
3. Die modellmäßige Erfassung
   3.1 Erzeugung
   3.2 Modal Split
   3.3 Verteilung
   3.4 Umlegung

Literaturhinweise

1 Aufgabenstellung

Die Notwendigkeit, planend auf das Phänomen "Güterverkehr" Einfluß nehmen zu können, macht es erforderlich, sich ein Modell davon zu schaffen. Professor Münnich hat dazu folgende Aussage gemacht: "Innerhalb einer systemtheoretischen Definition von Planen hat die Bildung von Modellen die Funktion, die Antizipation potentieller Regelungseingriffe zu ermöglichen." Und weiter "Planen ist der regelnde Eingriff eines Planungssystems in ein Umweltsystem, wobei die regelnden Eingriffe aufgrund einer im Planungssystem vorhandenen modellhaften Vorstellung über das Umweltsystem und die Zusammenhänge zwischen Planungs- und Umweltsystem auf ihre potentiellen Folgen hin und diese potentiellen Folgen aufgrund der im Wertsystem gespeicherten Informationen auf ihre Wünschbarkeit hin untersucht werden." (1)

Dem Aufgabenbereich des Technikers wird wohl in diesem Rahmen besonders der Aufbau des Modellteils zugerechnet werden, der sich i.w. mit den funktionalen Zusammenhängen und Regelmechanismen befaßt, also in etwa mit einer Versuchsanordnung zu vergleichen ist. Ohne Einbezug eines Wertsystems ist das allerdings auch nicht möglich.

Die Versuchsanordnung hat die Aufgabe, sichtbar zu machen, welche Folgen bzw. Ergebnisse Eingriffe in das komplexe System "Güterverkehr" haben, das in seiner Funktionsstruktur nicht simultan intellektuell erfaßt werden kann. Es soll für absehbare Zeit im Stande gehalten werden, eine wertvolle (d.h. ... auch zu bewertende) Dienstleistung für das Gemeinwesen zu erbringen.

Bei einer Einrichtung einer Versuchsanordnung drängt sich infolge ihrer Definition gleich ein Konstruktionsprinzip auf, nämlich: die Realität möglichst genau zu kopieren, um realistische Versuchsergebnisse zu bekommen. Dies beschwört die Gefahr der systemimmanenten Planung herauf, die zu übersehen heute vielfach den Planern zum Vorwurf gemacht wird.

Aus ingenieurmäßigem Denkschema heraus kommt man allerdings zu einer Richtschnur für die Modellkonzeption, die zumindest theoretisch diese Gefahr umgeht: Sie orientiert sich i.w. an der Aufgabe, die das Planungsobjekt erfüllen soll und an der Planungsaufgabe, die daraus abzuleiten ist. Natürlich kann kein Modellbauer Systeme entwickeln, die keinen Bezug zu der von ihm erfahrenen Realität haben. Außerdem ist der Grund zum Aufstellen eines Modells - wie schon erwähnt - der, daß das Planungsobjekt in seiner komplexen Systematik vom Planer nicht gleichzeitig vollständig erfaßt werden kann, - was der Modellbauer somit auch nicht kann und wodurch er gezwungen ist, sich immer wieder an der vorhandenen Realität zu orientieren. Da Planung aber in allen Bereichen immer mehr im Begriff ist, als permanenter Regelungsprozeß eingeführt zu werden, darf man auch in diesem Bereich damit rechnen, daß die in den Prozeß einbezogenen Modelle laufend dem neuesten Stand der Erkenntnisse angepaßt werden.

Der Weg zu dem hier angesprochenen Modell soll jedenfalls bei der Präzisierung der Planungsaufgabe beginnen, wobei auch die Aufgabe des Güterverkehrsapparates selbst ange-

sprochen werden muß. Letzteres geht, wie schon angemerkt, nicht, ohne gewisse Ziel- und somit Wertvorstellungen zu implizieren:

Wenn ich z.B. möglichst neutral zu formulieren versuche, "Güterverkehr entsteht zum größten Teil dadurch, daß Objekte von dem Ort, an welchem sie verfügbar sind, zu dem Ort transportiert werden, an dem der Mensch über sie verfügen will", und ich will den Güterverkehr auch in Zukunft ermöglichen oder sogar erleichtern, so impliziere ich schon die mögliche Wertung, daß es u.U. besser sein kann, die Güter zu den Menschen als die Menschen zu den Gütern zu bringen. - - Die Gretchenfrage bei der Einbringung von Wertvorstellungen scheint mir darum mehr die zu sein: Wo fange ich an, jemand zuständigerem ins Handwerk zu pfuschen?

Bei Nennung von Eigenschaften des Gesamtsystems Gütertransport, auf welche die technische Planung Einfluß nehmen soll, setze ich jedenfalls voraus, daß folgende wertende Zielvorstellungen unumstritten sind:

Der Standard der Versorgung der Bevölkerung mit Gütern soll zumindest erhalten und wenn möglich verbessert werden.

Der technische Fortschritt in der Produktion von Gütern und Dienstleistungen soll gefördert werden mit dem Ziel, den Menschen fortschreitend von nicht kreativen Tätigkeiten zu entbinden.

Die angekündigten Eigenschaften sind:

Erreichbarkeitsdichte
Leistungsfähigkeit
Geschwindigkeit
Transportsicherheit
Güterkonservierung
Verträglichkeit mit dem Personenverkehr

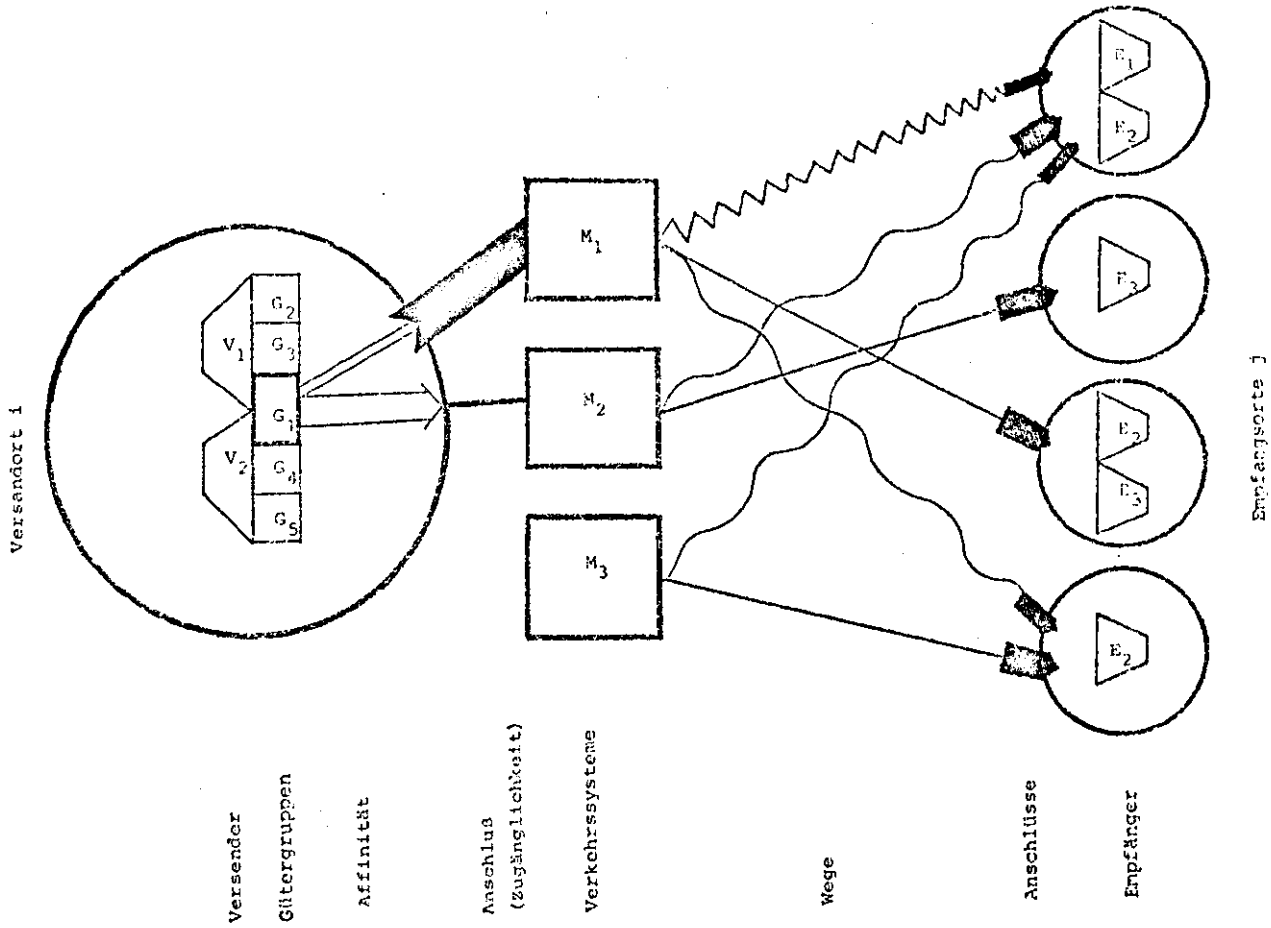
Ihre Verbesserung im Rahmen der Angemessenheit des Aufwandes, wie er von Politikern und Ökonomen vorgegeben werden mag, will ich hier als Planungsaufgabe betrachten.

Die Eigenschaften beruhen auf der Beschaffenheit nachstehender Gütertransporteinrichtungen:

Wegenetz (Straße, Schiene, Kanal etc.)
Zugangseinrichtungen (Ladestellen, Güterbahnhöfe, Anschlußgleise, Häfen etc.)
Strecken- und Knotenausbau im Wegenetz
Zahl und Fassungsvermögen der Fahrzeuge bzw. Behälter oder Transporteinheiten
Geschwindigkeit der Fahrzeuge
Verkehrsleiteinrichtungen

Diese Einrichtungen sind das Feld, in dem die Planungseingriffe schließlich vollzogen werden müssen. Sie sind der Apparat, für den der Ingenieur einen Plan zu erstellen hat. Um diesen Plan anfertigen zu können, werden Bemessungsunterlagen benötigt, .. d.h. Daten über die Leistungen, die die aufgeführten Einrichtungen in Zukunft erbringen sollen. Die Lieferung dieser Daten über die Anforderungen an die zukünftigen Gütertransporteinrichtungen stellt sich so als Hauptaufgabe des Modells dar.

Bemessungsunterlagen und davon abgeleiteter Ausführungsplan stellen den Modellteil "Zusammenhang zwischen Planungs- und Umweltsystem" wie in der zu Anfang gebrachten systemtheoretischen Definition angeführt, dar. Im noch fehlenden Modellteil "Umweltsystem" müssen folgende Komplexe, die mit dem Güterverkehrsapparat in Wechselwirkung treten, repräsentiert sein: die Güter, deren Versender, deren Empfänger, der Raum in bezug auf alle im Modell auftretenden lokalisierbaren Größen. Der Wechselwirkung selbst läßt sich durch die schematische Darstellung der Funktions- und Kausalkette bei einem Transportvorgang näherkommen.



Bevor diese funktionalen Zusammenhänge im Modell dargestellt werden können, sind allerdings noch einige Voraussetzungen zu erfüllen, die entscheidenden Einfluß auf die planerische Effektivität des Modells haben werden:

1. Die Aggregation der Transportgüter zu erfaßbaren Gruppen und der Versender und Empfänger zu entsprechenden Sektoren.

2. Die Einteilung des Planungsraumes und seines Umlandes in Verkehrszellen.

2 Grundlegende Vorarbeiten

2.1 Aggregation der Variablen

In seiner vor kurzem erschienen Arbeit "Probleme regionaler Güterfernverkehrsprognosen" (2) hat sich Herr Becker vom Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster sehr eingehend mit der Problematik der Verwendung aggregierter Variablen in Güterverkehrsmodellen beschäftigt. Er hat auch ein iteratives Verfahren zur optimalen Aggregation von Wirtschaftssektoren auf dem Wege über die Triangulation von Transaktionsmatrizen entworfen. Optimale Aggregation ist dabei verstanden als die Aggregationsebene, die für das gesamte Modell die günstigste Informationsbilanz zeitigt. Eine Erhöhung der Aggregationsebene kann z.B. ein höheres Bestimmtheitsmaß bei den widergegebenen stochastischen Zusammenhängen erzeugen, aber durch mangelnde Detailliertheit den für Planungsbelange notwendigen Rückbezug auf die Realität behindern. - Das vorgeschlagene Verfahren erscheint mir allerdings sehr kompliziert und aufwendig. Ich meine, daß durch die erforderliche Modellaussage und die Beschaffenheit des zur Verfügung stehenden statistischen Ausgangsmaterials - abgesehen von der erforderlichen Angemessenheit des Aufwandes - dem Aggregationsverfahren bereits soviele Randbedingungen gestellt sind, daß es sich ohne ein derart kompliziertes Modell vollziehen lassen müßte.

Die Auswahl der zu aggregierenden Komponenten sollte mit dem Ziel, funktionale Homogenität zu erreichen, getroffen werden. Die meisten Merkmale, die bei den Komponenten einer Gruppe homogen sein sollen, sind bei den Transportgütern zu berücksichtigen. Sie nehmen zudem die Schlüsselposition für die funktionsgerechte Aggregation auch der Versender und Empfänger ein.

Ein erster regelrechter Komplex von Homogenitätskriterien ergibt sich daraus, daß im Modell Beziehungen zwischen der Beschaffenheit der Transportgüter und der Beschaffenheit der Transportmittel wiedergegeben werden müssen. Dies bedingt, daß die Gütergruppen derart zusammengestellt sein sollten, daß ihre Komponenten jeweils etwa gleichartige Anforderungen an die Beschaffenheit der Transportmittel stellen. Diese Affinitätsbeziehungen können in einer Matrixdarstellung möglicherweise etwas veranschaulicht werden:

GÜTEREIGENSCHAFTEN \ TRANSPORTSYSTEMEIGENSCHAFTEN	Größe der Transporteinheiten	Kapazitätsanpassungsfähigkeit	Transportkosten	Zugangsdichte (z.B. Häfen/Zelle)	Beförderungsgeschwindigkeit
Güterwert	=	=	=	=	x
Partiengröße	x		x	x	=
Mechanische und/oder chemische Empfindlichkeit (→ Transportsicherungsaufwand)	=	=	=		x
Zeitempfindlichkeit (Wertverlust/Zeit)	=	=	=	=	x
Stetigkeit der Transportnachfrage	x		x	x	=

"=" direkt proportionaler Zusammenhang

"x" umgekehrt proportionaler Zusammenhang

Es läßt sich daraus entnehmen, daß allein etwa 5 Kriterien bei den Gütern für ein Aggregationsschema berücksichtigt werden müssen, welches die Erfassung der wechselseitigen Bezüge zwischen Gütern und Verkehrsmitteln gewährleisten soll.

Zusätzlich zu berücksichtigen ist dann noch, daß die Möglichkeit der Definition von Verkehrsströmen bzw. Verkehrsbedarfsbeziehungen im Modell sichergestellt werden muß.

Hierdurch werden weitere Anforderungen an die Homogenität der Gütergruppen gestellt: In der Idealvorstellung müßten die Komponenten der Gütergruppen eine jeweils gleichartige Kombination von Versendern und Empfängern haben, denn im Modell betrachtete oder erzeugte Güterströme einer Gruppe sollen sich nicht infolge ihrer heterogenen Zusammensetzung sondern nur aufgrund der Nachfragestruktur von der Quelle auf mehrere Ziele oder am Ziel aufgrund der Angebotsstruktur auf mehrere Quellen verteilen. Die Elemente einer Gütergruppe müßten also in einem gemeinsamen Wirtschaftssektor produziert und in gleicher Zusammensetzung in den Empfangssektoren konsumiert, gehandelt oder weiterverarbeitet werden.

An dieser Stelle greifen Aggregation der Güter und Aggregation der Wirtschaftssektoren ineinander: Die genannten Wirtschaftssektoren sollten echte oder unechte Teilmengen der Versender- oder der Empfängeraggregate sein. Weitere Aggregationskriterien der Sektoren sind z.B. : Verflechtung der Produktionsprozesse und Häufigkeit gemeinsamer Standorte, Gleichartigkeit der Kenndaten und gemeinsame Repräsentation in der Statistik.

Die güterorientierte Zusammenfassung aber, die sich beim Versand an Produktionsweisen und beim Empfang mehr oder minder am Konsumbedarf orientiert, hat zur Folge, daß Versand- und Empfangssektoren unterschiedliche Aggregate sein werden.

2.2 Erfassung und Einteilung des Planungsraumes

Die zweite noch vor dem Modellbau zu erfüllende Voraussetzung, die Verkehrszelleneinteilung, kann auch als regionale Aggregierung betrachtet werden. -- Soll ein Verkehrsmodell im technischen Sinn voll determinierte Verkehrsströme produzieren, so muß es ein interregionales Modell sein.

Die den Regionen in diesem Zusammenhang entsprechenden Verkehrszellen müssen in ihren Ausmaßen so beschaffen sein, daß sie zur Lokalisierung der Quellen und Ziele von Strömen im Modell dienen können. D.h. die Verkehrszelleneinteilung muß der Detailliertheit der Darstellung der Verkehrsnetze im Modell angepaßt sein. Kriterium für diese Anpassung muß die Möglichkeit sein, ohne Verfälschung des Netzbelastungsbildes für jede Zelle in jedem Verkehrsnetz einen repräsentativen Einspeise- und Ausflußstrang festzulegen. Die Ausdehnung der regionalen Aggregation ist hierdurch nach oben begrenzt.

Eine Begrenzung der regionalen Disaggregation ist dadurch gegeben, daß vermieden werden muß, die Aggregierung der Versand- und Empfangssektoren wieder zu unterlaufen. D.h., daß mit kleiner werdenden Verkehrszellen die Zusammensetzung der dort angesiedelten Wirtschaftssektoren und der ihnen zugeordneten Gütergruppen immer spezieller wird. Ihre durch die Zusammenfassung herausgestellten Haupteigenschaften können auf diese Weise ganz in den Hintergrund treten und durch Eigenschaften von zufällig dominierenden Komponenten verdrängt werden, die bei der eigentlich vorausgesetzten Komponentenmischung nicht ins Gewicht fallen (Verlust des "product mix"). Nach Festlegung einer Verkehrszelleneinteilung sollten aus diesem Grunde die Sektor- und Güteraggregate noch einmal auf ihre Verwendbarkeit geprüft werden, indem man die Verteilung ihrer Zusammensetzung über die Verkehrszellen analysiert.

Dies ist insbesondere wichtig, wenn die Verkehrszelleneinteilung zusätzlich noch nach anderen, mehr pragmatischen Gesichtspunkten vorgenommen wird: Für ein bundesweites Modell z.B. wäre es sicher zweckmäßig, die bisher für die Bundesfernstraßenplanung zugrundegelegte Zelleneinteilung zu übernehmen. So liegen auch für Bundesländer, sowie größere und kleinere Planungsregionen schon in vielen Fällen aufgrund von Verkehrsplanungsarbeiten Zelleneinteilun-

gen vor, die bei Planungen für den Güterverkehr berücksichtigt werden sollten, um die Ergebnisse der Einzelplanungen kompatibel und zu einem Gesamtbild integrierbar zu machen.

3 Die modellmäßige Erfassung

3.1 Erzeugung

Bei meinen ersten Überlegungen zur Erzeugung und Verteilung des Güterverkehrs war es mir bestechend erschienen, den Güterfluß in einem dem Muster des interregionalen Input-Output-Modells entsprechenden Modell erfassen zu können. Bei näherem Hinsehen jedoch zeigten sich einige Schwierigkeiten und Hindernisse: Die Beschaffung von regional gegliederten Daten in der für ein Verkehrsmodell notwendigen tiefen Staffelung aus amtlichen Statistiken ist z.B. aufgrund der Geheimhaltungsbestimmungen nicht zu bewerkstelligen. Auch erscheint es mir sehr schwierig, die technischen Inputkoeffizienten oder die regionalen Verteilungskoeffizienten auf der Basis von Mengeneinheiten zu bilden. Gesagt wurde bereits, daß die Input- (Empfangs-)-sektoren vollkommen anders als die Output-(Versand-)-sektoren aggregiert sein müßten.

So erscheint es zweckmäßig, nach dem Personenverkehr erprobten Muster erst einmal ein Teilmodell "Verkehrserzeugung" aufzustellen, ohne die "Verkehrsverteilung" gleich miteinzubeziehen. Die Zielgröße ist hier die Menge einer Gütergruppe, die in einer Verkehrszelle versandt oder empfangen wird. Einflußgrößen sind charakterisierende Strukturdaten der Versand- oder Empfangssektoren, die dieser Gütergruppe zugeordnet sind und ihren Standort in der betrachteten Verkehrszelle haben. Getrennt nach Versand und Empfang müssen die Zusammenhänge zwischen Ziel- und Einflußgrößen für jede Gütergruppe im Modell dargestellt werden. Sie können jedoch nicht rein deterministisch als Funktionen konstruiert werden, sondern es sind

Funktionsansätze zu machen, die anhand der heute erhobenen Verhältnisse geprüft und geeicht - d.h. quantifiziert werden müssen.

Versand $Q_{Gi} = \sum_k a_{qGk} \cdot X_{qki}$

Empfang $Z_{Gj} = \sum_k a_{zGk} \cdot X_{zkj}$

<u>Größen:</u>

Q	Versandmenge
Z	Empfangsmenge
X	Einflußvariable
a	Gewichtungsfaktor

<u>Indizes:</u>

i	Bezug auf eine Versandzelle
j	Bezug auf eine Empfangszelle
q	Bezug auf den Versand
z	Bezug auf den Empfang
G	Bezug auf eine Gütergruppe
k	Laufindex der Einflußvariablen

Dabei sollten zuerst Daten für den Planungsraum als Gesamtheit zugrunde gelegt und ausgewertet werden. Für die Analyse ist es zweckmäßig, auf diese Weise erst einmal die Funktionen mit der weitestgehenden Repräsentativität zu formulieren. Daran anschließend muß eine Querschnittsanalyse zeigen, ob sich die diagnostizierten Erzeugerfunktionen bis auf die Ebene der Verkehrszellen regionalisieren lassen. Ist dies nicht der Fall, muß nocheinmal Hand an die Aggregierungen gelegt werden, wobei wahrscheinlich die Aggregate verkleinert werden müssen, um die regionalen Inhomogenitäten im "product mix" der Gruppen zu reduzieren.

Um die Ausmaße möglicher Änderungen in den Beziehungen zwischen Leitdaten und Verkehrsaufkommen über die Zeit abschätzbar zu machen, sollte eine Analyse von Zeitreihen der

betrachteten Variablen - sofern vorhanden - vorgenommen werden. Bei der Interpretation der dabei gemachten Beobachtungen kann man bei Vernachlässigung der kurzfristigen, auf Konjunkturschwankungen beruhenden Erscheinungen davon ausgehen, daß die Veränderungen weitgehend auf Änderungen menschlicher Gruppenverhaltensweisen oder neuen Produktionsmethoden beruhen. Beide Ursachen führen kaum zu sprunghaften Entwicklungen, wie das für die menschlichen Verhaltensweisen leicht einzusehen ist; aber auch für neue Produktionsmethoden gilt, daß diese zwar kurzfristig, aber in den seltensten Fällen überall gleichzeitig und in großen Bereichen eingeführt werden, wodurch auch sie im Gesamterscheinungsbild des Güterverkehrs erst allmählich bemerkbar werden. Bei Entdeckung von solchen Trends muß versucht werden, diese unter Beachtung der genannten Gesichtspunkte zu analysieren und sie in möglichst kausal fundierter Form in die Erzeugungsgesetzmäßigkeiten des Modells miteinzubeziehen.

3.2 Modal Split

In der Planung für den Personenverkehr ist dem Teilmodell "Verkehrserzeugung" i.a. das Teilmodell "Verkehrsverteilung" angefügt. Daran schließt sich dann die Aufteilung der Verkehrsbedarfsbeziehungen auf die verfügbaren Verkehrsmittel an. Diese Reihenfolge ist im Fall "Personenverkehr" dadurch begründet, daß für die meisten Fahrtzwecke die Wahl des Fahrtzieles nicht so stark von der Auswahl der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel beeinflußt wird.

Im Güterverkehr jedoch wird durch die verfügbaren Verkehrsmittel eine sehr definitive Vorauswahl der möglichen Fahrtziele getroffen. Nicht jeder Anbieter und nicht jeder Nachfrager eines Gutes hat Zugang zu jedem Verkehrsmittel, und nicht jedes Verkehrsmittel ist für jedes Gut gleichermaßen oder überhaupt geeignet. Durch das Transportmittelangebot

wird für jedes Gut an jedem Ort ein spezifischer Absatz - oder Bezugsmarkt erschlossen. Die Struktur dieser Märkte ist für die Verteilung der Verkehrsbedarfslinien im Raum von maßgeblichem Einfluß. Aus diesem Grunde ist es empfehlenswert, in einem Planungsmodell für den Güterverkehr den modal split - die Aufteilung auf die Verkehrssysteme - direkt nach der Verkehrserzeugung <u>vor</u> der Verkehrsverteilung anzuordnen.

Um die Gesetzmäßigkeiten im modal split sichtbar zu machen, muß das Angebot der Transportsysteme in zwei Bereichen analysiert werden:

1. der qualitativen Affinität zu den Gütergruppen, die schon bei der Behandlung der Probleme der Aggregation zur Sprache gekommen ist;
2. der Erreichbarkeit und Verbindung von Versendern und Empfängern bzw. der Markterschließung.

$$Q_{Gmi} = a_{Gqmi} \cdot Q_{Gi}$$

$$Z_{Gmj} = a_{Gzmj} \cdot Z_{Gj}$$

$$a_{Gqmi} = a_{Gqm} \cdot \Gamma_{Gqmi}$$

$$a_{Gzmj} = \underbrace{a_{Gzm}}_{\text{Bereich 1}} \cdot \underbrace{\Gamma_{Gzmj}}_{\text{Bereich 2}}$$

<u>Größen:</u>

Q	Versandmenge
Z	Empfangsmenge
a	Aufteilungs- (Affinitäts-)-koeffizienten
Γ	Erschließungsfaktor

<u>Indizes:</u>

i	Bezug auf eine Versandzelle
j	Bezug auf eine Empfangszelle
q	Bezug auf den Versand

z Bezug auf den Empfang
G Bezug auf eine Gütergruppe
m Bezug auf ein Transportsystem

Bereich 1 betreffend sei wieder auf die Matrix hingewiesen, die zeigt, welche Gütereigenschaften mit welchen Variablen der Transportmittel in Abhängigkeit stehen (s. 2.1).

In der darin enthaltenen Liste der Transportmitteleigenschaften befinden sich die Begriffe "Zugangsdichte" und "Beförderungsgeschwindigkeit". Diese führen bei näherem Hinsehen zu der Erkenntnis, daß es eine reine Affinität eines Gutes zu einem einzigen Transportmittel nur im Ausnahmefall geben kann, da sie Eigenschaften des Netzes des betrachteten Verkehrssystems darstellen. Die Netze der Transportsysteme aber sind für jeden Raum individuelle Gebilde. Aus diesem Grunde können die Affinitäten der Güter zu Transportmitteln in der Regel nur Affinitäten zu Transportsystemen in bestimmten Räumen sein.

Um trotzdem die räumliche Differenzierung des Modalsplit nachher getrennt erfassen zu können, soll für Bereich 1 nur die Aufteilung des Transportaufkommens der einzelnen Gütergruppen auf die vorhandenen Verkehrsträger für den Planungsraum als Ganzes betrachtet werden. Die darin sichtbar werdenden Relationen sind ein relatives Maß für die Attraktivität der nicht räumlich (d.h. innerhalb des Planungsraumes) differenzierten Eigenschaften der Transportsysteme auf die Gütergruppen.

$$a_{Gqm} = \frac{Q_{Gm}}{Q_G} = \frac{\sum_i Q_{Gmi}}{\sum\sum_{mi} Q_{Gmi}}$$

$$a_{Gzm} = \frac{Z_{Gm}}{Z_G} = \frac{\sum_j Z_{Gmj}}{\sum\sum_{mj} Z_{Gmj}}$$

$i = 1,\ldots,n$
$j = 1,\ldots,n$
$m = 1,\ldots,l$

Zu 2: Zur Beschreibung des für den Standort des Versenders oder Empfängers durch ein Verkehrsmittel erschlossenen Marktes wird die Formulierung von Erreichbarkeitskriterien in einheitlichen Größen für alle Transportsysteme notwendig. Diese Größen müssen eine Aussage darüber enthalten, wieviele mögliche Empfänger einer Gütergruppe unter welchem Aufwand von den entsprechenden Versendern in einer Verkehrszelle über ein Transportsystem erreicht werden können, oder - im umgekehrten Fall - wieviele mögliche Versender einer Gütergruppe unter welchem Aufwand die entsprechenden Empfänger in einer Verkehrszelle über ein Transportsystem erreichen können. Zur Errechnung solcher Größen sind die Transportsysteme in ihrer Netzstruktur, ihren Tarifen und ihren Verlade- und Anschlußeinrichtungen in jeder Verkehrszelle zu erfassen.

$$\Gamma_{Gqmi} = g_{mi} \cdot [\sum_j Z_{Gj} \cdot (\frac{g_{mj}}{w_{mij}})]^{\alpha}$$

$j = 1,2,\ldots (i-1), (i+1),\ldots n$

$$\Gamma_{Gzmj} = g_{mj} \cdot [\sum_i Q_{Gi} \cdot (\frac{g_{mi}}{w_{mji}})]^{\beta}$$

$i = 1,2,\ldots (j-1), (j+1),\ldots n$

Neue Größen:

$g_{mi(j)}$ Zugänglichkeit eines Transportsystems "m" in einer Zelle "i" oder "j" .

w_{mij} Transportwiderstand im Wegenetz des Transportsystems "m" zwischen 2 den Zellen "i" und "j" zuzuordnenden Punkten .

Um die formulierten Abhängigkeiten zu quantifizieren bzw. an Daten der Gegenwart zu eichen, kann folgendes Verfahren angewendet werden:

Versand und Empfang von Gütern nach Gütergruppen und Transportmitteln werden in der BRD für den GFV jährlich kreisweise erhoben.

Q_{Gmi}, Z_{Gmj}

Summiert man diese Werte über die Kreise (≙Zellen), so hat man die Transportmengen, die - je Gütergruppe - in der gesamten BRD auf die einzelnen Verkehrsmittel entfallen.

$$\sum_i Q_{Gmi} = Q_{Gm} \text{ (BRD)}$$

$$\sum_j Z_{Gmj} = Z_{Gm} \text{ (BRD)}$$

Wie vorher beschrieben, lassen sich daraus die Aufteilungskoeffizienten

$$a_{Gqm} = \frac{Q_{Gm}}{\sum_m Q_{Gm}}$$

und $a_{Gzm} = \frac{Z_{Gm}}{\sum_m Z_{Gm}}$, die die qualitative Affinität (Bereich 1) repräsentieren, für die BRD berechnen. Um nun den durch (Bereich 2) zu interpretierenden Teil zu untersuchen, kann folgendermaßen weitergearbeitet werden: Es läßt sich für jede Zelle (Kreis) das Erhebungsmaterial über "m" summieren.

$$\sum_m Q_{Gmi} = Q_{Gi}$$

$$\sum_m Z_{Gmj} = Z_{Gj}$$

Der modal-split-Zusammenhang in erweiterter Form war (s. S."-4"):

$$Q_{Gmi} = a_{Gqm} \cdot \Gamma_{Gqmi} \cdot Q_{Gi}$$

$$Z_{Gmj} = a_{Gzm} \cdot \Gamma_{Gzmj} \cdot Z_{Gj}$$

Bis auf Γ sind, wie aus dem Vorangehenden hervorgeht, alle Größen aus dem Erhebungsmaterial zu entnehmen. Infolgedessen läßt sich die Erschließungsgröße an folgendem Quotienten empirisch eichen:

$$\Gamma_{Gqmi} \stackrel{!}{=} \frac{Q_{Gmi}}{a_{Gqm} \cdot Q_{Gi}}$$

$$\Gamma_{Gzmj} \stackrel{!}{=} \frac{Z_{Gmj}}{a_{Gzm} \cdot Z_{Gj}}$$

Wenn die Güterverkehrserhebungen in der geplanten Form fortgeführt und ausgewertet werden, dürften die Erfassung dieses Funktionsteils in Zukunft immer mehr vervollkommnet werden können.

3.3 Verteilung

Bei der sich nun anschließenden Verkehrsverteilung wird infolge des schon vollzogenen Modalsplits die Verteilung der Güterströme nicht global für den ganzen Raum vorgenommen, sondern getrennt für jedes Transportsystem und innerhalb des dadurch gebildeten Raum-Zeit-Markt-Systems. Die in diesem Teilmodell erzeugten Bedarfswerte sind folgendermaßen indiziert: F_{ijmG}. Für jede Gütergruppe muß für jedes Verkehrsmittel eine Verteilungsrechnung durchgeführt und eine Matrix erstellt werden.

Mit den Verteilungsrechnungen hat sich Herr Becker auch in seinem schon früher erwähnten Buch befaßt. Er hat die Verteilungsmodelle nach Moses, Fratar, das Gravitationsmodell und ein eigenes verglichen und die Brauchbarkeit der beiden ersten und seines eigenen in einer Ex-Post-Prognose getestet. Dabei ist er zu dem Ergebnis gelangt, daß ein Verteilungsmodell auf jeden Fall zweidimensional arbeiten sollte, d.h., daß bei der Berechnung eines Verkehrsbedarfswertes sowohl die Randbedingungen des Versandes als auch die des Empfangs Berücksichtigung finden müssen. Er zieht diesen Schluß daraus, daß das Fratarmodell in seinem Test die besten Ergebnisse gebracht hat, obwohl er dessen rein mathematisch iterativer Methode wegen ihres Mangels an ökonomischen Kriterien kritisch gegenübersteht.

Das Moses-Modell, welches das Versandaufkommen nach den einmal erhobenen Handelskoeffizienten - wie Becker sagt - "eindimensional" auf Empfänger verteilt und sein eigenes Modell, welches eine eingeschränkte zweidimensionale Verteilung mit einer konservierenden Behandlung der bestehenden Handelsverbindungen verknüpfen soll, bringen keine befriedigenden Ergebnisse. Das Gravitationsmodell hatte Herr Becker nicht einbezogen, da er nicht glaubte, den dazu notwendigen Widerstandsansatz machen zu können. In seiner abschließenden Betrachtung jedoch äußert er die Überlegung, daß möglicherweise eine Kombination der Fratarmethode mit einem Widerstandsansatz das der Realität am besten entsprechende Modell sein könne -- ein Modell, welches in etwa dann dem Gravitationsmodell wieder entsprechen würde.

Bei dem bisher von mir skizzierten Aufbau eines Gesamtmodells sind bereits im Modalsplit Widerstandsfunktionen in Ansatz gebracht. Sie sind bei der Verteilung nochmals anzusetzen. Sie beschreiben hier ebenso wie dort die gleichen Elemente des Umweltsystems: nämlich den Feldkräften von Angebot und Nachfrage im Raum gegenüberstehende Leiterqualitäten der Transportsysteme, wie Beförderungskosten, Fahrweglänge, Beförderungszeit u.a.

Der hin und wieder geäußerte Einwand, der Ansatz von Widerstandsfunktionen in Güterverkehrsmodellen sei unsinnig, weil das Beharrungsvermögen von traditionalen Handels- und Lieferbeziehungen bedeutend wirksamer sei als geringe durch Infrastrukturveränderung sich ergebende Kostenverschiebungen, scheint mir durch Herrn Beckers Feststellung der Untauglichkeit eines mit konstanten Handelskoeffizienten arbeitenden Modells widerlegt zu sein. Darüber hinaus bin ich aber auch der Meinung, daß sich die Planung der Fortentwicklung eines weiträumigen Güterverkehrssystems nicht <u>so</u> stark an den - wenn auch beharrlichen - festgestellten, überlieferten Verkehrsbeziehungen der vorhandenen Erzeuger orientieren darf, daß sie lediglich von einer Prognose der Veränderung in deren Stärke ausgeht. Sondern das Planungsziel sollte sein, für eine von der Landesplanung vorzugebende Anordnung der

sozio-ökonomischen Aktivitäten im Planungsraum ein System von Transporteinrichtungen zu schaffen, das deren Gütertransportbedarf im Rahmen von Randbedingungen optimal deckt. Durch den Ansatz eines Verteilungsmodells in der Form des Gravitationsgesetzes müßte es sich verwirklichen lassen, die Prämissen der Landesplanung sowohl in Hinsicht auf die räumliche Anordnung der Nachfrager als auch die sozialen und wirtschaftlichen Zielvorstellungen für die Qualität der Anbindung betreffend, zu berücksichtigen. In Anlehnung an das bei uns für den Personenverkehr eingesetzte Verteilungsmodell könnte dieser folgendermaßen aussehen: (3)

$$F_{ijmG} = 0{,}5 \cdot Q_{imG} \cdot Z_{jmG} \cdot [f(w_{ijm})]^{-1} \cdot \left[\frac{1}{\sum_i \{Q_{imG} \cdot [f(w_{ijm})]^{-1}\}} + \frac{1}{\sum_j \{Z_{jmG} \cdot [f(w_{ijm})]^{-1}\}}\right]$$

3.4 Umlegung

Zwischen der Darstellung der Verkehrsbedarfswerte im Modell und der endgültigen Konzipierung von Plänen, den direkten Eingriffen in das Planungsobjekt also, bedarf es noch der Zuordnung der Verkehrsbedarfswerte zu den Einzelelementen der Transportsysteme "F_{ijmGr}". Hier in dieser i.a. "Umlegung" genannten Modellstufe ist der Entscheidungspunkt des Prüfungsprozesses für die modellintern getesteten "Versuchsmodelle" der einzelnen Transportsysteme und des Gesamtsystems. Hier findet die Belastungsprobe des für das Planziel konzipierten Verkehrsapparates statt und die dabei sichtbar gemachten Mängel geben die entscheidenden Informationen für die noch vorzunehmenden Veränderungen. Wesentlich geänderte Konzepte müssen vom Modalsplit an wieder in alle Modellstufen Eingang finden und der Ablauf des Modellprozesses muß von dort an wiederholt werden. Dieser Vorgang ist so oft zu wiederholen, bis keine Diskrepanzen zwischen Belastungen und Leistungsfähigkeiten im Modell mehr bestehen. Zusätzlich können natürlich auch noch wirtschaftliche oder politische Optimierungskriterien beim Prüfprozeß mit in Ansatz gebracht werden.

Mögliche technische Verbesserungen an den Transportsystemen sind folgende:

Bessere Anpassung der Transporteinheiten an die Transportgüter
Erhöhung der Zahl der vorgehaltenen Transporteinheiten
Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Verbesserung der Anpassung der Verladeeinrichtungen
Erhöhung der Zahl der Anschlüsse und Verbesserung der Anschlußlage
Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Strecken und Knoten
Verdichtung und Rationalisierung der Netze
Rationalisierung und Sicherung des Betriebs

Für die Entscheidung, welche dieser Maßnahmen im speziellen Fall zur Anwendung kommen sollen, kann das Modell Belastungsbilder auf zwei verschiedenen Aggregationsebenen liefern:

Wie bei den Modellen zur Darstellung des Personen- oder Gesamtverkehrs können die Netzbelastungen der Verkehrsträger in der Dimension (Transporteinheiten/Zeiteinheit) sichtbar gemacht werden und als Kriterien für die Planungsmaßnahmen dienen, die sich nur auf Netzelemente beziehen.

Für die Planungseingriffe an Einrichtungen, die mit den Transportgütern in direkten Kontakt kommen, ist von gütergruppenspezifischen Belastungen in der Dimensionskategorie (t, cbm oder Stück/Zeiteinheit) auszugehen, die eigentlich auch primär vom Modell geliefert werden, da die Bedarfswerte schon nach Gütergruppen getrennt ermittelt worden sind.

Die Darstellung der Belastung in der erstgenannten, höheraggregierten Form macht allerdings den Ansatz einer Größe notwendig, die mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist: nämlich des Auslastungsgrades der Transporteinheiten, der wiederum stark vom Anteil der Leerfahrten abhängig ist. Für zentral gesteuerte Transportsysteme sind diese Größen

optimierbar bzw. minimierbar und können daher im Modell weitgehend deterministisch angesetzt werden. Im Individualverkehr jedoch kann es nur einen stochastischen Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad und dem Transportaufkommen und dessen Verteilung im Raum geben. Die geplante Einführung einer zentralen Erfassung des Straßen-Güterverkehrs mittels EDVA zur Erteilung von Dispositionshilfen an den einzelnen Unternehmer dürfte diesen Zusammenhang zwar einerseits ändern, aber andererseits straffer und besser erfaßbar machen.

Der Parameter, den beide Belastungsdimensionen im Nenner führen, ist bisher in diesem Zusammenhang noch sehr wenigen Untersuchungen unterzogen worden: die Zeiteinheit. Die Verkehrsträger haben Leistungen zu vollbringen. Nach geforderten Leistungen sind sie zu bemessen. Leistung ist Arbeit pro Zeiteinheit. Die Auswahl der zweckmäßigen Bemessungszeiteinheit muß so getroffen werden, daß ihr ein Belastungswert zugeordnet werden kann, der für den gesamten Belastungspegel repräsentativ ist und mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit einen ungestörten Betriebsablauf gewährleistet. Daraus folgt, daß nicht nur die zeitliche Fortentwicklung des Transportaufkommens anhand von Jahreserwartungswerten in Betracht gezogen werden muß, sondern daß auch dessen zyklische Schwankungen analysiert und berücksichtigt werden müssen.

Diese Schwankungen, bei denen i.w. ein Jahres-, ein Wochen- und ein Tagesrhytmus zu erkennen ist, werden z.T. von den Verkehrserzeugern und z.T. von den Verkehrsträgern verursacht. In den langfristigen Zyklen können ausschließlich die Verkehrserzeuger als Verursacher identifiziert werden; in den kurzfristigeren, insbesondere beim Nahverkehr, mehr die Verkehrsträger.

Für die Erfassung der Zeitfunktionen im Modell müssen die langwelligen Effekte durch die gleichen Ursachen erklärt werden, die für Produktions- und Versandschwankungen verantwortlich sind. Die kurzwelligen Bewegungen sind i.a. Ausflüsse des Arbeitsrhythmus bei Versendern, Empfängern und Verkehrsträgern.

Im Zusammenhang mit der Zeitfunktion muß noch eine andere b ei der Umlegung wirksam werdende Funktion betrachtet werden, die bisher hauptsächlich in den Modellen für den individuellen Personenverkehr in Ansatz gebracht wurde: Die Änderung der Netzwiderstände in Abhängigkeit von der Belastung und deren Auswirkung - meist unter dem Fachanglizismus "capacity restraint" zusammengefaßt. Während bei der Umlegung des individuellen Personen- oder Gesamtverkehrs bei Überlastung von Netzelementen Teile der Belastung auf weniger belastete, zwar etwas längere - aber in diesem Zustand zeitlich wieder günstigere Routen umgeleitet werden, wie sich das auch im tatsächlichen Verkehrsgeschehen vollzieht, muß zumindest im Güter f e r n verkehr auch mit einer Verschiebung der Fahrtzeiten innerhalb eines Tages oder sogar innerhalb einer Woche gerechnet werden. Es folgt daraus, daß es sinnvoll wäre, für den Güterfernverkehr bei den Belastungsbildern die Zeiteinheit "Woche" anzusetzen und für den Güternahverkehr den Tag. Die Einheitspegel, nach denen die Belastungswerte dann auf Bemessungszeiträume (i.a. Stunden oder Stundengruppen) bezogen werden können, müssen aufgrund zukünftig erwarteter Verhaltensmuster insbesondere der im Verkehrsgewerbe tätigen Arbeitskräfte unter Berücksichtigung der möglichen zeitlichen Umlagerungen der Belastung konstruiert werden.

Die Umlegungsverfahren selbst sind nach den Besonderheiten der Netzformen und der Organisations- bzw. Betriebsformen der Verkehrsträger auszuwählen. Neben einfachen überschaubaren Netzen mit individuellem Betrieb - wie z.B. beim Binnenschiffsverkehr - auf welche die Belastungen ohne wesentliche Hilfsmittel - quasi von Hand - umgelegt werden können, gibt es den Verkehrsträger, der zwar ein kompliziertes Netz hat, aber wegen seiner zentralen Steuerung die Belastungen nach rein betriebstechnischen und wirtschaftlichen Erwägungen darauf verteilen kann, nach Kriterien also, die im Modell weitgehend deterministisch wiedergegeben werden können - und das individuelle Straßenverkehrssystem für welches Alternativroutensuch- und "capacity restraint"-Verfah-

ren angewendet werden müssen. Bei letzterem verkompliziert sich dieser Modellprozeß dadurch, daß der "capacity restraint" sich nicht auf den Güterverkehr als Belastungsgröße beschränken darf, sondern die Gesamtbelastung der Netzelemente zu berücksichtigen hat. Besonders in begrenzten Räumen muß also der individuelle Straßengüterverkehr in einem Arbeitsgang mit dem individuellen Personenverkehr umgelegt werden. Bei der Prognose für weiträumige Gebiete kann es aufgrund der geringeren Netzdichte u.U. sinnvoller sein, die gesamte Belastung auf Bestrouten umzulegen, da sich auf diese Weise ein besserer Einblick in die Rationalität und Zweckmäßigkeit des betrachteten Netzes bietet.

Auf die Gefahr hin, auch viel schon bekanntes und manchem trivial erscheinendes zu bringen, habe ich in meinen Ausführungen die Absicht verfolgt, in groben Zügen eine Modellkette zu beschreiben, wie sie zur technischen Beplanung der Güterverkehrseinrichtungen eines größeren Raumes angewendet werden müßte.

Literaturhinweise

(1) Münnich, F.
Regionalmodelle als Planungsinstrumente
"Stadt-Region-Land" Heft 24 (Schriftenreihe des Instituts für Stadtbauwesen der RWTH)

(2) Becker, J.
Probleme regionaler Güterfernverkehrsprognosen
Beiträge aus dem Institut für Verkehrswissenschaft an der Universität Münster, Heft 64

(3) Mäcke, P.A.
Das Prognoseverfahren in der Verkehrstechnik
Bauverlag Wiesbaden 1964