

Ein Ansatz zur Bestimmung und
Beurteilung von Auswirkungen
energietechnischer Innovationen
mit Hilfe eines kombinierten
Energie- und Wirtschaftsmodells

An approach towards determining
and assessing effects of innovations
in energy supply by means of a
combined energy and economy model

R. Bünde

IPP 4/132

Mai 1975

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Ein Ansatz zur Bestimmung und
Beurteilung von Auswirkungen
energietechnischer Innovationen
mit Hilfe eines kombinierten
Energie- und Wirtschaftsmodells

An approach towards determining
and assessing effects of innovations
in energy supply by means of a
combined energy and economy model

R. Bünde

IPP 4/132

Mai 1975

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

IPP 4/132

R. Bünde

An approach towards determining and assessing effects of innovations in energy supply by means of a combined energy and economy model

May 1975 (in German)

Abstract

The energy system is represented as part of a national economy and analysed by means of the input-output technique. The development of a mathematical model based on two existing models using the same technique is described. This will allow the time behaviour of the energy system and the total system to be simulated and optimized for different objective functions and constraints. In addition, consequences of impacts on the system, e.g. the development of a new energy source such as the fusion reactor, can be shown.

V O R W O R T

Der notwendige Aufwand für die Arbeiten in den einzelnen Forschungs- und Entwicklungslinien zum Fusionsreaktor nimmt ständig zu. Die insgesamt für Forschung und Entwicklung zur Verfügung stehenden Mittel des Staates werden dagegen knapper. Daraus ergibt sich die Frage, welche der verfolgten Linien, gemessen an den Erfordernissen des Energiemarketes, die größten Erfolgsaussichten hat, und weiterhin die Frage, ob "der" Fusionsreaktor überhaupt ein lohnenswertes Ziel ist. Diese Fragen führen auf das generelle Problem der Vorausbeurteilung von - hier energietechnischen - Innovationen. In diesem Zusammenhang den Nachweis der sogenannten "gesellschaftlichen Relevanz" zu verlangen, ist unbillig, weil dieser Begriff selbst und damit auch der Weg zur Bestimmung bisher nicht definiert sind. Vielmehr ist es notwendig, den prinzipiellen Zusammenhang zwischen einer Innovation und der Gesellschaft schrittweise zu analysieren. Erst danach kann untersucht werden, in welcher Weise z.B. eine energietechnische Innovation den gesamten Weg von der Energietechnik über die Energiewirtschaft, die Gesamtwirtschaft und die Umwelt verändern und sich so auf die Gesellschaft auswirken kann.

Der vorliegende Bericht behandelt die Analyse des Gesamtsystems "Mensch-Umwelt-Gesamtwirtschaft-Energiewirtschaft-Energietechnik" und einen Ansatz, dieses System in einem Modell abzubilden. Ein Teil der Arbeiten zu diesem Bericht ist während der Mitgliedschaft des Autors in der Programmleitung des Programmes "Angewandte Systemanalyse" der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) entstanden. Der Autor dankt seinen Kollegen in der Programmleitung und Mitarbeitern der GfK Karlsruhe, der

KfA Jülich und des IPP sowie insbesondere den Herren Prof. Häfele (International Institute for Applied Systems Analysis - IIASA -, Laxenburg), Dr. Trenkler und Dipl.-Ing. Wilck (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke - VDEW-, Frankfurt/M.) und Prof. Steimle (Universität Essen) für wertvolle Diskussionen und Anregungen.

I N H A L T

1. Zusammenfassung
2. Einleitung
3. Das Energie-System als Teil des Gesamtsystems
4. Grobanalyse des Energie-Systems
 - 4.1 Die Elemente des Systems
 - 4.2 Größen zur Beschreibung des Systemzustandes
 - 4.2.1 Kosten
 - 4.2.2 Nutzen
 - 4.2.3 Risiko
 - 4.2.4 Reduzierte Zustandsgrößen
 - 4.3 Zustandsänderungen
5. Ein Modell des Gesamtsystems mit besonderer Detaillierung des Energieteils
 - 5.1 Prinzipieller Aufbau eines statischen Gesamtmodells
 - 5.2 Übergang vom statischen zum dynamischen Modell
 - 5.3 Bisherige und laufende Arbeiten zu Modellen dieser Art
 - 5.3.1 Allgemeiner Überblick
 - 5.3.2 Das Jorgensen-Modell
 - 5.3.3 Das Hoffmann-Modell
 - 5.3.4 Das kombinierte Hoffmann-Jorgensen-Modell
 - 5.4 Noch notwendige Arbeiten
 - 5.4.1 Vervollständigung des Gesamtmodells
 - 5.4.2 Übergang auf die allgemeinen Zustandsgrößen

6. Grenzwerte für die Nebenbedingungen
 - 6.1 Mindestwerte für die Nutzenergie
 - 6.2 Obergrenzen für die Umweltveränderungen
 - 6.3 Noch notwendige Arbeiten

7. Mögliche Untersuchungen mit Hilfe des Gesamtmodells
 - 7.1 Überblick
 - 7.1.1 Simulation des Systemverhaltens ohne staatliche Eingriffe
 - 7.1.2 Bestimmung der Auswirkungen staatlicher Maßnahmen
 - 7.1.3 Bestimmung der optimalen Kombination staatlicher Maßnahmen
 - 7.2 Untersuchungen über die Auswirkungen energietechnischer Innovationen

8. Schlußfolgerungen für die systemtechnischen Arbeiten zu Fusionsreaktoren

9. Literatur

ANHANG

1. Zusammenfassung

Ausgehend von grundsätzlichen Überlegungen über die Notwendigkeit, Auswirkungen energietechnischer Neuerungen im voraus abschätzen zu müssen, wird das Energie-System zunächst als Teil des Gesamtsystems einer Volkswirtschaft dargestellt. Danach wird das Energie-System mit Hilfe der Input-Output-Technik grob analysiert: die Elemente des Systems werden beschrieben und es werden auf der Basis der Begriffe "Kosten", "Nutzen" und "Risiko" Größen zur Erfassung des Systemzustandes hergeleitet. Analog zu dieser Analyse wird dann der Aufbau eines mathematischen Modells beschrieben, mit dem das zeitliche Verhalten des Energie-Systems zusammen mit dem der Gesamtwirtschaft simuliert werden kann. Dabei handelt es sich um ein Wirtschaftsmodell, bei dem der Energiesektor weitgehend detailliert, die übrigen Sektoren jedoch in stark aggregierter Form dargestellt sind. Bei dem Aufbau dieses Modells können zwei vor kurzem in den USA erstellte Modelle verwendet werden - ein Wirtschaftsmodell und ein Modell, welches die technischen Zusammenhänge des Energie-Systems einschließlich der Umweltbeeinträchtigungen erfaßt. Nach Formulierung von Zielfunktionen und zugehörigen Nebenbedingungen kann dieses Simulationsmodell zu Optimierungen des zeitlichen Verlaufs des Systemzustandes verwendet werden. Insbesondere kann dabei untersucht werden, in welcher Weise sich staatliche Eingriffe in das Energie-System auf den Systemzustand auswirken. Damit wird es möglich, auch die Auswirkungen der staatlichen Förderung der Entwicklung neuer Energietechnologien - also auch des Fusionsreaktors - abzuschätzen. Dazu ist es jedoch noch notwendig, die charakteristischen Merkmale der verschiedenen Arten denkbarer Fusionskraftwerke zu bestimmen.

2. Einleitung

Die Entwicklung der Energiewirtschaft in den vergangenen Jahren verlangt eine Intensivierung der Energieforschung, während die Entwicklung der Gesamtwirtschaft dagegen eine Verknappung der finanziellen Mittel für die Forschung bewirkt. Deshalb ist es notwendig, alle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Energietechnik daran zu messen, ob und in welcher Weise sie im Erfolgsfall zu einer Verbesserung der Energieversorgung beitragen können. Der Bereich der Energietechnik erstreckt sich dabei von der Gewinnung der verschiedenen Primärenergieträger über die Möglichkeiten der Energiewandlung, der Speicherung und des Transportes bis hin zu den Nutzungstechnologien. Um eine Beurteilung beabsichtigter Innovationen zu ermöglichen, müssen zunächst deren Auswirkungen auf die Energieversorgung bestimmt werden. Anschließend ist zu fragen, ob diese Auswirkungen erwünscht sind oder nicht.

Die Auswirkungen technischer Entwicklungen auf die Energieversorgung lassen sich nur dann umfassend bestimmen, wenn man den rein technischen Vorgang der Versorgung von Verbrauchern mit Energie im Rahmen der Energiewirtschaft und diese wieder im Rahmen der Gesamtwirtschaft und der Umwelt betrachtet. Die Vielfalt und die Unübersichtlichkeit der Zusammenhänge innerhalb des Systems Umwelt-Gesamtwirtschaft-Energiewirtschaft-Energietechnik haben in der Vergangenheit dazu geführt, daß man die Auswirkungen energietechnischer Entwicklungen jeweils nur in stark vereinfachter Weise untersucht hat. Die in den letzten Jahren vor allem in den USA erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der Systemanalyse lassen jedoch den Versuch aussichtsreich erscheinen, das gesamte System detailliert zu analysieren. Der Analyse - z.B. das Auffinden der inneren Verknüpfungen und der Eingriffsmöglichkeiten von außen - folgt die mathematische Beschreibung dieser Verknüpfungen. Die Gesamt-

heit der sich ergebenden Gleichungen und Ungleichungen stellt ein Modell des Systems dar. Es gestattet, das Verhalten des Systems zu simulieren. Eine der Eingriffsmöglichkeiten in das System besteht z.B. darin, energietechnische Forschung und Entwicklung von staatlicher Seite aus zu fördern. Ein Modell ermöglicht es, zu zeigen, in welcher Weise sich die daraus entstehenden Innovationen auf das Gesamtsystem "Umwelt-Gesamtwirtschaft-Energiewirtschaft-Energietechnik" auswirken würden.

Die Entscheidung darüber, welche dieser Auswirkungen positiv und welche negativ zu werten sind und welches relative Gewicht den einzelnen Auswirkungen zugemessen werden soll, verlangt übergeordnete Maßstäbe. Die Forderung, solche Maßstäbe aus den Belangen der Gesellschaft direkt abzuleiten, ist bei dem heutigen Stand der soziologischen, sozioökonomischen und medizinischen Forschung nicht erfüllbar. So können die Zusammenhänge nur grob analysiert werden, und aus dieser Analyse können Fragen für die drei genannten Forschungsbereiche formuliert werden. Heutige Überlegungen zur Beantwortung dieser Fragen sind nicht mehr als vorläufige Ansätze. Das Konzept, das den in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten zugrunde liegt, ist so aufgebaut, daß es die spätere Beurteilung beabsichtigter energietechnischer Innovationen anhand gesellschaftlicher Maßstäbe grundsätzlich nicht ausschließt. Das Hauptgewicht der Arbeiten liegt dabei jedoch auf der Bestimmung der Auswirkungen der Innovationen auf das System "Umwelt-Gesamtwirtschaft-Energiewirtschaft-Energietechnik".

3. Das Energie-System als Teil des Gesamtsystems

Die wesentlichen Merkmale des Gesamtkonzeptes werden anhand der in Abb. 1 gezeigten schematischen Darstellung beschrieben. Ausgangspunkt ist die Summe der in der betrachteten Region lebenden Menschen, die Gesellschaft (Block I). Die Gesellschaft organisiert ihr Zusammenleben selbst und delegiert die dazu notwendigen Arbeiten an einen Teil ihrer Mitglieder, die dann die staatlichen Organe bilden. Diese (Block II a) haben zunächst die Aufgabe, die grundlegenden Gesetze für die Gesellschaft zu formulieren. Im Sinne einer mathematischen Optimierung können solche Gesetze als Ausdruck einer Zielfunktion mit Nebenbedingungen angesehen werden. Die integrale Optimierungsaufgabe besteht dann darin, den Nutzen für die Gesellschaft zu maximieren (Zielfunktion), den Aufwand - ausgedrückt in Kosten - und das Risiko dabei jedoch unter bestimmten Grenzen zu halten (Nebenbedingungen). Da sich die Summen der Werte für Nutzen N, Kosten K und Risiko R aus einer Vielzahl von Anteilen aus unterschiedlichen Aktivitätsbereichen zusammensetzen, kann die integrale Optimierungsaufgabe in folgender Weise formuliert werden:

Zielfunktion: Maximiere $N = \sum_{i=1}^n N_i = \text{MAX}$ (1)

n = Anzahl der Aktivitätsbereiche

Nebenbedingungen für die Kosten $K = \sum_{i=1}^n K_i \leq K_{\text{max}}$ (2)

für das Risiko $R = \sum_{i=1}^n R_i \leq R_{\text{max}}$ (3)

Weiterhin haben die staatlichen Organe die Aufgabe, die Grenzwerte für die Nebenbedingungen unter Berücksichtigung

der Realisierbarkeit auf die einzelnen Aktivitätsbereiche aufzuteilen. Für den i -ten Bereich ergeben sich damit zur

$$\text{Zielfunktion} \quad N_i = \text{MAX} \quad (4)$$

die

$$\text{Nebenbedingungen} \quad K_i \leq K_{i_{\text{max}}} \quad (5)$$

$$\text{und} \quad R_i \leq R_{i_{\text{max}}} \quad (6)$$

Als Aktivitätsbereiche können - ähnlich wie zum Beispiel in [1] - in stark aggregierter Form angegeben werden:

- 1) Landwirtschaft, Rohstoffgewinnung, Bauwesen
- 2) Güterproduktion (ausschließl. Ölprodukte)
- 3) Dienstleistungen, Handel, Kommunikationswesen
- 4) Verkehrswesen
- 5) Energie .

Jeder dieser Bereiche unterliegt nicht nur den grundlegenden Gesetzen der Gesellschaft - wie sie in II a formuliert wurden - sondern auch den weiter ins Detail gehenden Gesetzen, die sich dann jedoch nur auf einzelne Bereiche beziehen. Ein Beispiel hierfür ist das Energiewirtschaftsgesetz, das überhaupt nur im Bereich (5) "Energie" relevant ist. Jeder Bereich ist (s. Abb. 1) deshalb noch einmal unterteilt in das eigentliche System (in (5) ist es das Energie-System) und die staatlichen Organe, die durch Gesetzgebung oder durch Entscheidungen der Exekutive auf dieses System einwirken können. Die Gesamtheit der innerhalb der Bereiche agierenden staatlichen Organe ist in dem gestrichelt gezeichneten Block II b zusammengefaßt. Die Gesamtheit der einzelnen Systeme der fünf Bereiche ist das Gesamtsystem aller Aktivitäten (strich-punktiert umrandeter Block III). Ein Großteil dieser Aktivitäten ist wirtschaftlicher Art, so daß die Gesamtwirtschaft einen wesentlichen Teil des Gesamtsystems ausmacht, nämlich gerade den,

der den materiellen Lebensstandard bestimmt. Im Sinne des hier verwendeten Begriffes "Nutzen" ist dieser Lebensstandard der materielle Anteil am zu maximierenden Gesamtnutzen.

Nutzen, Kosten und Risiken aus den einzelnen Bereichen ergeben aufsummiert den aus allen Aktivitäten resultierenden Nutzen, die Kosten und die Risiken für die gesamte Gesellschaft. Diese drei Größen können daher als Zustandsgrößen einer Gesellschaft angesehen werden.

Mit der Darstellung von Abb. 1 ist der Energiebereich in seinem Zusammenhang mit den anderen Bereichen und in seiner Unterordnung unter das Ziel der gesellschaftlichen Optimierung gezeigt worden. Im folgenden wird der Energiebereich allein betrachtet (Index $i = \text{Index } E$). Dem Bereich ist mit den Gleichungen (4), (5) und (6) eine Optimalitätsforderung vorgegeben. Es entspricht jedoch eher der Praxis, diesen Optimierungsansatz durch das zugehörige Dual auszudrücken, bei dem die Nebenbedingung (5) in die Zielfunktion und die Zielfunktion (4) in eine Nebenbedingung übergeht. Es sind dann die

$$\text{Zielfunktion:} \quad K_E = \text{MIN} \quad (7)$$

und die

$$\text{Nebenbedingungen:} \quad N_E \geq N_E \text{ min} \quad (8)$$

$$R_E \leq R_E \text{ max} \quad (9)$$

Diese neue Zielfunktion fordert, daß alle Maßnahmen der staatlichen Organe (II b) im Energiebereich so getroffen werden, daß die Kosten K_E bei vorgegebenem Mindestnutzen $N_E \text{ min}$ und vorgegebenem maximal zulässigem Risiko $R_E \text{ max}$ ein Minimum werden.

Um die einzelnen Maßnahmen und deren Kombination nach Art, Zeitpunkt und Umfang optimal wählen zu können, müssen die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die

Zustandsgrößen des Systems vorher bekannt sein. Wegen der vielfältigen Interdependenzen im Energie-System ist es notwendig, ein mathematisches Modell dieses Systems zu verwenden, mit dem man - ausgehend von einem Zustand zum Zeitpunkt t_0 - den zeitlichen Verlauf der Zustandsgrößen vorausbestimmen kann. Erst mit einem solchen Energie-Modell ist es möglich, die Gesamtheit der Auswirkungen solcher Maßnahmen im Energie-System zu erkennen.

Es ist jedoch nicht zu erwarten, daß aufgrund solcher Modelluntersuchungen die optimale Lösung gefunden werden kann. Vielmehr werden die Ergebnisse mit einer bestimmten Bandbreite behaftet sein, weil die Eingangsdaten und die Verknüpfungen innerhalb des Modells nicht exakt erfaßbar sind. Daher werden sich auch im Bereich des Optimums verschiedene Lösungen im Rahmen einer gewissen Bandbreite anbieten. Um diese Lösungen untereinander zu vergleichen, ist das Energie-System gemäß Abb. 1 in das Gesamtsystem einzuordnen und es ist zu untersuchen, in welcher Weise sich die energie-optimalen Lösungen auf andere Bereiche und auf die Gesamtwerte für Kosten, Nutzen und Risiko auswirken. Eine solche Untersuchung setzt voraus, daß auch für die anderen Bereiche passende mathematische Modelle vorhanden sind, wenngleich diese nicht so detailliert sein müssen wie das Energie-Modell. Auf diese Weise könnte die Anzahl derjenigen Maßnahmen bzw. Kombinationen von Maßnahmen zum Erreichen des Optimums, das dann schon ein gesellschaftliches Optimum ist, weiter eingeschränkt werden. Die dann notwendige Entscheidung der staatlichen Organe wird nach dem Opportunitätsprinzip gefällt werden, das den Machtverteilungen innerhalb des gesamten Energiebereiches - Kasten (5), Abb. 1 - Rechnung trägt. +)

+) Nach diesem Prinzip wird heute die Mehrzahl der Entscheidungen über staatliche Maßnahmen im Energiesystem getroffen. Wegen der vor allem in der Bundesrepublik noch wenig entwickelten Methoden zur Analyse von Systemen ist die Beratung durch Gruppen von Fachleuten das wesentliche Hilfsmittel für diese Entschei-

dungen. Da diese Fachleute in der Regel gleichzeitig Interessenvertreter sind, werden viele Entscheidungen von den Machtverhältnissen innerhalb des Energie-Systems geprägt. Machtkonzentrationen haben in erster Linie das Ziel, sich zu verstärken, erst danach rangiert das Gemeinwohl (auf das die staatlichen Organe dagegen verpflichtet sind). Daß die Analyse des Energie-Systems und darauf aufbauende Modelluntersuchungen den Spielraum für das Ausbalancieren von Machtgruppierungen einschränken würden, ist sicherlich mit ein Grund für die "im Energie-System" verbreitete Abneigung gegenüber der Systemanalyse.

Die Analyse des Energie-Systems und die darauf aufbauende Konstruktion eines Energie-Modells sind damit unerläßliche Voraussetzungen, um die Auswirkungen staatlicher Maßnahmen in diesem System vorher bestimmen und beurteilen zu können.

4. Grobanalyse des Energie-Systems

Es ist im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich, das Energie-System detailliert zu analysieren. Die Elemente des Systems werden deshalb nur grob beschrieben, danach werden die Methoden zur Erfassung des Systemzustandes und Möglichkeiten zum Einwirken auf das System erläutert.

4.1 Die Elemente des Systems

Die wesentlichen Bestandteile des Systems sind

- a) der Verbraucher: Energie kann direkt oder indirekt genutzt werden. Ein Beispiel für die direkte Nutzung ist die Raumheizung, indirekte Energienutzung ist der Verbrauch von Gütern, zu deren Produktion Energie eingesetzt wurde.

- b) die Summe der energietechnischen Einrichtungen zur Versorgung der Verbraucher. Die Kette dieser Einrichtungen reicht von den Anlagen zur Gewinnung der Primärenergieträger bis zu denen der Nutzung (z.B. Raumheizungsanlagen).
- c) die Unternehmen, die die energietechnischen Einrichtungen zur Versorgung der Verbraucher unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einsetzen.

Die Zuordnung der energietechnischen Einrichtungen (b.) zur Energienutzung seitens des Verbrauchers (a.) kann mit Hilfe einer Matrix (Abb. 2) erfaßt werden. Die Matrix umfaßt in Spalten und Zeilen dieselben Primär- und Zwischen-Energieformen sowie die vom Verbraucher direkt und indirekt verwendete Nutzenergie. Als indirekte Energienutzung wird der Endverbrauch von Gütern bezeichnet, zu deren Herstellung Energie verwendet wurde. Die Punkte in einer Zeile geben an, in welche anderen Energiearten die am linken Rand der Matrix angegebene Energieart direkt umgewandelt werden kann. Die jeweils in einer Spalte eingezeichneten Punkte nennen diejenigen Energiearten, aus denen die am oberen Rand der Matrix angegebene Energieart direkt erhalten werden kann.

Die Berücksichtigung des auch in den Bereich ② "Güterproduktion" gehörenden Sektors "Energie in Gütern" ist ein Beispiel dafür, in welcher Weise der Energiebereich mit anderen Bereichen (vgl. Abb. 1, Bereiche ⑤ und ②) verknüpft ist. In der mit "Energie in Gütern" bezeichneten Spalte sind diejenigen Energiearten angegeben, die direkt zur Produktion von Investitions- und Konsumgütern verwendet werden. Die mit "Energie in Gütern" bezeichnete Zeile berücksichtigt diejenigen Investitionsgüter, die jeweils direkt für die Bereitstellung der am oberen Rand der Matrix

angegebenen Energiearten verwendet werden, z.B. alle Anlagen zur Brennstoffversorgung, Energieumwandlungsanlagen, Installationen für die Groß- und Kleinverteilung von Energie sowie Einrichtungen zur Energienutzung. Der Punkt in der unteren rechten Ecke der Matrix berücksichtigt alle Investitionsgüter, die zur Produktion von anderen Investitions- und von Konsumgütern genutzt werden. Die anderen Bereiche des Gesamtsystems (vgl. Abb. 1, Bereiche (1), (3) und (4)) können prinzipiell in gleicher Weise in diese Matrix mit aufgenommen werden.

Eine Matrix der Art von Abb. 2 gibt jedoch nur an, welche der am linken Rand angegebenen Kategorien zur Erzeugung der oben angegebenen Kategorien prinzipiell verwendet werden können. Sie ist damit Ausdruck der von der Physik her gegebenen Möglichkeiten und des genutzten technischen Wissens. Bei dem hier betrachteten Teil des Gesamtsystems - die Bereiche (5) und (2) - ist mit dieser Darstellung jedoch nur die Zuordnung aller energietechnischen Einrichtungen zum Verbraucher erfaßt. Das dritte Element des Energie-Systems, die Unternehmen dieses Bereiches (c.), kann nur berücksichtigt werden, indem man über diese technische Zuordnung hinaus auch die wirtschaftliche Situation festhält. Dazu ist es notwendig, die in der Abb. 2 eingezeichneten Punkte zu quantifizieren, so daß die Elemente der Matrix die Höhe des jeweiligen Umsatzes angeben. Da diese Elemente ihrer Art nach heterogen sind - insbesondere wenn man alle fünf in Abb. 1 gezeigten Bereiche berücksichtigt - wird als Maßeinheit der Geldfluß (Geldwert im Betrachtungszeitraum, ausgedrückt in Währungseinheiten pro Jahr) verwendet. Die Zahlenwerte dazu - und damit die Koeffizienten der Matrix - liefert die Wirtschaftsstatistik. Die sich ergebende Matrix wird als Input-Output-Matrix bezeichnet. Sie ist eine gängige Art der Darstellung

einer wirtschaftlichen Situation in einem bestimmten Zeitraum [2], [3] und kann sowohl für das Gesamtsystem als auch für Teilsysteme verwendet werden. In Abb. 3 sind die Koeffizienten der Matrix $X = // x_{i,j} //$ an die Stelle der Punkte von Abb. 2 gesetzt. Während Abb. 2 nur die technischen Zusammenhänge charakterisiert, gibt Abb. 3 die jeweiligen Geldwertflüsse an. Diese Geldwertflüsse können auch in einem Netzdiagramm dargestellt werden (Abb. 4). Darin ist sowohl jeder Energiekategorie als auch der Kategorie "Energie in Gütern" ein Balken zugeordnet. Die Art der einzelnen Umsätze wird durch Pfeile von einem Balken zum anderen charakterisiert. Zu jedem Pfeil kann der zugehörige Energieumsatz oder der entsprechende Geldwertfluß angegeben werden. Die Aussagen von Matrix und Netzdiagramm gestattet jedoch zusätzlich von die Angabe der Art der einzelnen energietechnischen Aktivitäten

- Gewinnung, Aufbereitung und Transport der Primärenergieträger zur Umwandlungsanlage,
- Umwandlung,
- Verteilung,
- Umwandlung zur Nutzung,

wie sie am oberen Rand der Abb. 4 zu sehen ist. Die Angabe dieser Aktivitäten schränkt die Vielfalt der Anordnungsmöglichkeiten des Netzdiagrammes ein und macht diese Darstellung übersichtlicher.

Den bisherigen Betrachtungen der Elemente des Energie-Systems wurde eine nur grobe Unterteilung der Primär-, Zwischen- und Nutzenergieformen zugrunde gelegt, um die Zusammenhänge deutlich erkennbar zu machen. Für detaillierte Untersuchungen des Energie-Systems ist eine weitgehende Disaggregation dieser Energieformen erforderlich; diese ist aus Tab. 1 ersichtlich.

4.2 Größen zur Beschreibung des Systemzustandes

Im vorangehenden Abschnitt sind die Elemente des Energiesystems anhand einer Matrix und eines Netzdiagrammes beschrieben worden, wobei zur Quantifizierung Geldwertflüsse verwendet wurden. Die Verwendung der Geldwertflüsse gestattet es, unterschiedliche Dinge wie Energiemengen und Güter miteinander zu vergleichen, und ist damit geeignet, den wirtschaftlichen Zustand des Energie-Systems zu beschreiben. Sie gestattet es jedoch nicht, das System vom Standpunkt des Nutzens und des Risikos für den Verbraucher zu betrachten. Im Sinne der Überlegungen des Abschnitts 3 ist der Zustand des Systems jedoch erst dann vollständig beschrieben, wenn Kosten, Nutzen und Risiko bekannt sind.

4.2.1 Kosten

In diesen Kosten sind jene Anteile zusammengefaßt, die dem Verbraucher aus der direkten und indirekten Nutzung von Energie entstehen. Die Kosten für die direkte Nutzung von Licht, mechanischer Energie und thermischer Energie auf niedriger Temperatur (NT) werden im Netzdiagramm durch die Geldwertflüsse an den Enden der entsprechenden Balken (rechts in Abb. 4) angegeben; diese Summe der Kosten für die direkte Nutzung ist

$$K_{E \text{ direkt}} = K_{\text{Licht}} + K_{\text{mech.E.}} + K_{\text{NT therm.E.}} \quad (10)$$

Darin ergeben sich die einzelnen Summanden jeweils aus der Summe des gesamten Geldwertes für eine Energieart abzüglich des Teiles, der für die Produktion von Gütern verwendet wird, also (s. Abb. 4)

$$K_{\text{Licht}} = \sum_{i=1}^{12} X_{i,11} - X_{11,12} \quad , \quad (11)$$

$$K_{\text{mech.E.}} = \sum_{i=1}^{12} X_{i,10} - X_{10,12'} \quad (12)$$

$$K_{\text{NT therm.E.}} = \sum_{i=1}^{12} X_{i,9} - X_{9,12} \quad (13)$$

Die Kosten für die indirekte Energienutzung - i.e. der Energiekostenanteil an den Konsumgütern - ergibt sich aus der Summe der Energiekosten für die gesamte Güterproduktion abzüglich der Energiekosten für die Produktion von Investitionsgütern, von denen ein Teil ($\sum_{j=7}^{12} X_{12,j}$) wieder energietechnische Investitionsgüter sind (s. Abb. 4):

$$K_{\text{indirekt}} = \sum_{i=1}^{12} X_{i,12} - \sum_{j=1}^{12} X_{12,j} \quad (14)$$

Die direkten und indirekten Kosten können mit Hilfe von Input-Output-Tabellen [2], [3], [4] bestimmt werden, die bezüglich der Energieanwendung ausreichend detailliert sind. Über diese und andere Verfahren, auch den Energieanteil in Konsumgütern zu bestimmen, existiert bereits eine umfangreiche Literatur (z.B. [4] - [10]). Danach ist es möglich, die insgesamt für die Produktion eines Gutes verwendete Energie pro Geldwertseinheit dieses Gutes zu bestimmen. Da andererseits aus der Statistik der Energiewirtschaft [11] die Energiebeträge und die Kosten für den direkten Energieverbrauch entnommen werden können, ist die Überführung der in den Abb. 3 und 4 verwendeten Geldwertflüsse in Energieflüsse möglich.

4.2.2 Nutzen

Um den Nutzen aus dem Verbrauch von Energie bestimmen zu können, muß die verbrauchte Nutzenergie - aufgeteilt nach den einzelnen Arten - bekannt sein. Es ist also zunächst notwendig - und, wie am Ende des vorhergehenden Abschnitts gezeigt, auch möglich - neben den Geldwertflüssen auch die Energieflüsse zu erfassen. Dazu können wiederum die Matrix

und/oder das Netzdiagramm als Darstellungsart verwendet werden. Es ist allerdings zu beachten, daß alle Aktivitäten mit Wirkungsgraden behaftet sind, bei dieser Darstellung jedoch die Verluste nicht explizit erfaßt werden. Ein Beispiel für eine solche Darstellung ist in [12] enthalten, wo jeder Pfeil - also jede Aktivität - mit der Eingangsenergie und dem Wirkungsgrad gekennzeichnet ist. Man kann jedoch jeden Pfeil auch mit dem Betrag der Ausgangsenergie (Produkt aus Eingangsenergie und Wirkungsgrad) aus der Aktivität kennzeichnen. Dann muß jedoch auf der rechten Seite des Netzdiagrammes (Abb. 4) ein Balken "Verluste" hinzugefügt werden, zu dem von allen anderen Balkenenden ausgezogene Pfeile führen, damit die Gesamt-Energiebilanz aufgeht. In entsprechender Weise muß die zugehörige Matrix um eine Spalte "Verluste" erweitert werden. Im Netzdiagramm sind damit die Aktivitäten - also z.B. die Umwandlung - jeweils auf das Balkenende konzentriert. Zeichnet man die einzelnen Pfeile in einer Stärke, die dem angegebenen Energiebetrag entspricht, und ersetzt die Balken durch Kästen passender Breite, dann erhält man das in Abb. 5 gezeigte Sankeydiagramm für die Energieflüsse. Abb. 6 zeigt ein solches Diagramm - entnommen aus [13] - mit den Daten für die Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1970. Solche Diagramme werden alljährlich von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen [11] erstellt, allerdings in einer Aufteilung, bei der die Nutzung nicht nach Energiearten sondern nach Verbrauchssektoren aufgeschlüsselt ist. Beide Darstellungen können jedoch ineinander überführt werden.

Die in Abb. 5 und 6 gezeigten Energieflußdiagramme weisen einen sehr hohen Anteil an Verlusten am Ende der Energiebilanz auf. Diese Verluste bestehen zum überwiegenden Teil aus thermischer Energie. Der Wert einer thermischen Energiemenge ist jedoch nicht nur durch den absoluten Betrag gegeben, sondern auch durch die Temperatur, bei der diese Wärmemenge zur Verfügung steht. Je geringer der Abstand der Temperatur zur Umgebungstemperatur ist, desto geringer ist der Wert dieser Wärmemenge. Diese Betrachtungen sind

dann wichtig, wenn man überlegt, im Sinne einer Einsparung des Primärenergieeinsatzes einen Teil der jetzt anfallenden Verlustenergie doch noch zu nutzen. Um überhaupt die Möglichkeiten, die sich hierzu bieten, zu erkennen, reicht die Darstellung des Energieflußdiagramms nicht aus, weil der Wert der thermischen Energie darin nicht erfaßt wird. Es ist deshalb notwendig, von jeder thermischen Energiemenge den Teil festzustellen, der in Bezug auf die Umgebungsverhältnisse genutzt werden konnte. Dieser Teil der thermischen Energie wird als Exergie bezeichnet, der nicht nutzbare Energieanteil als Anergie. Nun kann die Exergie für jede andere Energieform auch bestimmt werden, denn sie ist allgemein definiert als derjenige Anteil einer Energie, der unbeschränkt in alle anderen Energieformen umgewandelt werden kann. Unter dem Gesichtspunkt der Verringerung von Verlusten im Energie-System ist es deshalb sinnvoll, an Stelle der Energieflüsse die Exergieflüsse zu betrachten, worauf jedoch im Rahmen dieses Berichts nicht weiter eingegangen werden kann.

Die bisherigen Betrachtungen in diesem Abschnitt bezogen sich auf den Begriff "Nutzenergie", die zum direkten und indirekten Verbrauch zur Verfügung gestellt wird. Damit ist jedoch noch nichts über den eigentlichen Nutzen gesagt, den der Verbraucher aus dieser Energie hat. Der Nutzen aus dem indirekten Energieverbrauch besteht im Gebrauch von Konsumgütern. Dieser Nutzen kann quantifiziert werden durch den Geldwertfluß für den Energieanteil an den Konsumgütern, wie er in der Matrix von Abb. 3 und dem Netzdiagramm von Abb. 4 zum Ausdruck kommt. Der Nutzen aus dem direkten Energieverbrauch ist schwieriger zu quantifizieren und kann nicht mit einem einzigen Wert erfaßt werden. Die mechanische Energie dient hauptsächlich

dazu, die dem Menschen eigene mechanische Energie zu verstärken oder zu ersetzen. Auf diese Weise werden bestimmte Aktivitäten erst möglich - z.B. der schnelle Transport über weite Entfernungen -, andere Aktivitäten werden erleichtert - z.B. im Haushalt. Neuere Arbeiten in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften versuchen [14], mit Hilfe von sogen. Sozialindikatoren den Begriff "Lebensqualität" zu quantifizieren. Wenn dann noch der Einfluß des direkten Energieverbrauchs auf diese Indikatoren bestimmbar ist, dann ist auch der eigentliche Nutzen aus der Verwendung der Nutzenergie erfaßbar. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind die Überlegungen hierzu noch zu vage, so daß man sich mit dem Energiebetrag der Nutzenergie oder deren Geldwert als Maßeinheit begnügen muß.

In Zukunft wird es jedoch zunehmend wichtig sein, den eigentlichen Nutzen aus der Verwendung von Energie erfassen zu können. Der wachsende öffentliche Widerstand gegen den Bau energietechnischer Anlagen (Kraftwerke, Hochspannungsleitungen, Raffinerien) verringert deren mittlere Installationsgeschwindigkeit erheblich. Es ist deshalb zu erwarten, daß zu einem späteren Zeitpunkt der Energiebedarf nicht mehr gedeckt werden kann. Bei Überlegungen zur Rationierung z.B. der elektrischen Energie wird dann eine Art "Energie-Existenzminimum" zu definieren sein; hierzu gibt es in den USA bereits Untersuchungen [15], [16]. Zumindest jedoch wird man über die prinzipielle Gestaltung der Energietarife stärker als bisher in den Markt eingreifen müssen. Die bisherige tarifliche Begünstigung der hohen Stromabnahme gibt einen Anreiz zu hohem Verbrauch. Im Sinne einer Verringerung des Verbrauchs müßten die Energiekosten oberhalb eines zu definierenden "Existenzminimums" jedoch überproportional steigen *). Nach

*) Hierauf ist auch während der öffentlichen Anhörung des Bundestagsausschusses für Forschung und Technologie zum Thema "Energieforschung" am 6.11.1974 hingewiesen worden.

amerikanischen Untersuchungen, auf die sich [17] bezieht, könnte - unter dortigen Verhältnissen - ein monatlicher Verbrauch von 600 kWh elektrischer Energie pro Haushalt als Wert hierfür angesehen werden.

4.2.3 Risiko

Neben den Kosten und dem Nutzen ist das Risiko, das sich für den Verbraucher aus dem Vorhandensein des Energiesystems ergibt, die dritte Größe zur Beschreibung des Systemzustandes. Ausgangspunkt aller Überlegungen zur Bestimmung dieses Risikos sind die Veränderungen der Umwelt des Menschen, die durch die Installation und den Betrieb der energietechnischen Einrichtungen bewirkt werden. Diese Veränderungen sind

- die Inanspruchnahme von Grundfläche und Raum und
- die Abgabe von Stoffen (Brennstoffe, Umwandlungsprodukte, Werkstoffe) und Energie (Wärme, Schall) an die Umgebung (Atmo-, Hydro- und Lithosphäre) im Normalbetrieb, bei Störfällen und bei der Stilllegung von Anlagen (siehe auch Tab. 2).

Eine andere Ursache für ein Risiko besteht darin, daß die Versorgung des Verbrauchers mit Energie ausfallen könnte. Die Gründe der Einschränkung der Verfügbarkeit können auf der Seite der Beschaffung von Stoffen liegen (Brennstoffe, Betriebsstoffe, Werkstoffe zum Bau von Anlagen) oder im Bereich der Zuverlässigkeit der Funktion energietechnischer Anlagen ("technische Verfügbarkeit"). Erläuterungen hierzu werden im Abschnitt 4.3 gegeben.

Da sich die Menschen in einem betrachteten Gebiet mit einer gewissen Dichteverteilung aufhalten und auch die energietechnischen Anlagen, die die Veränderung der Umgebung bewirken, eine Dichteverteilung aufweisen, ist es zunächst notwendig, diese Verteilungen zu erfassen. Über die Bevölkerungsverteilung gibt es zumindest in den Industrie-

ländern detaillierte Statistiken, in der Bundesrepublik zum Beispiel [18]. Ausgehend von einem Kataster aller energietechnischen Einrichtungen sind dann die örtlichen Verteilungen des Grundflächenbedarfs und der Emissionen zu bestimmen. Erste Arbeiten zu solchen Katastern in der Bundesrepublik sind für kleinere Industriegebiete - unter Einschluß aller industriellen Aktivitäten - durchgeführt worden [19], [20]. Auch im Zusammenhang mit der Standort-suche für Kernkraftwerke und Wiederaufbereitungsanlagen wurden Studien hierzu angefertigt bzw. begonnen (z.B. [21], [22]). Diese Arbeiten enthalten zum Teil bereits auch den Übergang von Emissionen auf Immissionen (örtliche Dichte-Verteilung des Niederschlages zuvor emittierter Stoffe) mit Hilfe umfangreicher Ausbreitungsrechnungen. Dem Immissionskataster für Stoffe entsprechen die Angaben über die örtliche Verteilung von Klimaänderungen aufgrund der Freisetzung von Wärme (bei Energie-Umwandlung und -Nutzung). Zur Bestimmung von Klimaänderungen in Ballungsgebieten sind derzeit Untersuchungen im Gange, z.B. [23]. Als Basis für die Risikobestimmung müssen die örtlichen Verteilungen aller Immissionen und Klimaänderungen beim Normalbetrieb der energietechnischen Anlagen und nach Störfällen (mit Angaben über die Wahrscheinlichkeit) bekannt sein.

Die Immission der verschiedenen Stoffe und die Klimaänderungen haben sowohl allein als auch in ihren vielfältigen Kombinationen miteinander Auswirkungen auf die Menschen. Diese Auswirkungen können in ihrer Bedeutung abgestuft werden nach

- Belästigung (z.B. durch die Verunstaltung der Landschaft)
- Belastung (z.B. Geruchsbelästigungen, Lärm)
- Krankheit (z.B. Inkorporieren von toxischen oder radioaktiven Stoffen, entweder kurzzeitig oder durch Kumulation im Körper über längere Zeiträume)
- Tod (z.B. durch radioaktive Stoffe oder mechanische Energie)

Die Stufen gehen fließend ineinander über. Die Beantwortung der Frage, ob man einzelnen Menschen oder Gruppen einer Bevölkerung das Risiko solcher Auswirkungen zumuten darf, setzt zunächst einmal voraus, daß man diese Auswirkungen kennt. Das gilt auch für diejenigen Auswirkungen, die aus der langfristigen Inkorporierung sich im Körper akkumulierender Stoffe resultieren *). Wenn diese Zusammenhänge bekannt sind, dann können aus den Katastern der Immissionen und Klimaänderungen Kataster für die einzelnen Risiken in einem betrachteten Gebiet gewonnen werden. Solange dies noch nicht möglich ist, muß man mit den erstgenannten Katastern auskommen oder mit den noch davor liegenden Katastern für die Emissionen von Stoffen und Energie.

4.2.4 Reduzierte Zustandsgrößen

Die Betrachtungen in den drei vorangegangenen Abschnitten über die Erfassung von Kosten, Nutzen und Risiken haben gezeigt, daß es derzeit noch nicht möglich ist, die Begriffe Nutzen und Risiko zu quantifizieren. Es ist deshalb zum gegenwärtigen Zeitpunkt notwendig, diese Begriffe auf diejenigen zurückzuführen, die gerade noch quantifizierbar sind.

Beim Nutzen ist das die Nutzenergie, die auf direkte und indirekte Weise vom Verbraucher verwendet wird. Die Nutzenergie bei der direkten Nutzung ist jeweils der Energiebetrag, der sich ergibt, wenn man die Energiezufuhr an ein Nutzungsgerät (z.B. eine Anlage für die Raumheizung oder eine Haushaltsmaschine) mit dessen Nutzungsgrad multipliziert.

*) Solange man hierüber keine genügenden Kenntnisse hat - wie z.B. im Zusammenhang mit der Kernspaltung - ist es unzulässig, von der Harmlosigkeit entsprechender Einrichtungen zu sprechen.

Die Nutzenergie bei der indirekten Nutzung - also beim Gebrauch von Konsumgütern - kann man aus dem Energieaufwand zur Produktion dieses Gutes und der mittleren Nutzungsdauer solcher Güter bestimmen.

Anstelle des Risikos können bisher nur die Immissionen von Stoffen und Schall sowie die Emissionen von Wärme quantifiziert werden, so daß man auf diese Werte vorerst zurückgreifen muß.

Die im Sinne des Abschnitts 3 notwendige Bestimmung der Zustandsgrößen Kosten, Nutzen, Risiko muß also zunächst bei den reduzierten Zustandsgrößen Kosten, Nutzenergie, Emissionen/Immissionen enden. Um die Vergleichbarkeit der einzelnen anhand von Abb. 1 definierten Bereiche zu ermöglichen, ist es jedoch notwendig, zu eindeutigen Relationen zwischen Nutzenergie und Nutzen sowie Immissionen bzw. Emissionen und Risiko zu kommen. Derzeit muß also der Zustand des Energie-Systems bereits als vollständig beschrieben angesehen werden, wenn die örtliche Verteilung der reduzierten Zustandsgrößen über dem betrachteten Gebiet angegeben wird. Als Basis für diese Verteilungen müssen bestimmt werden

- der Bestand an energietechnischen Installationen,
- die Energie- bzw. Energieflüsse sowie
- die Stoffflüsse, wobei nur im Sinne der Energietechnik relevante Stoffe zu erfassen sind, also alle Stoffe zur Herstellung und Erhaltung sowie zum Betrieb energietechnischer Anlagen einschließlich der energietechnischen Anlagen selbst.

Hilfsmittel dazu ist das über die Input-Output-Analyse erhältliche Geldwertflußdiagramm. Wie bereits gezeigt wurde, stehen Flüsse und Bestandsveränderungen der Geldwerte in bestimmten Relationen zu den Energie- und Stoffflüssen bzw. -bestandsveränderungen. Wegen der Variation von Ort zu Ort müssen alle Größen in Form eines Katasters angegeben werden.

4.3 Zustandsänderungen

Nachdem in diesem Kapitel bisher die Elemente des Energie-Systems und die Größen zur Beschreibung seines Zustandes behandelt wurden, sollen jetzt noch die wesentlichen Ursachen für Zustandsänderungen erläutert werden. Zustandsänderungen sind im Sinne der mit den Gln. (7) - (9) formulierten Optimierungsmaxime gestattet, solange die Nebenbedingungen nicht verletzt werden und das System sich einem optimalen Zustand nähert.

Zunächst einmal sind die in Abb. 1, Block IIa, definierte Nutzenmaximierung und die daraus abgeleitete Kostenminimierung im Energie-System (Gln. (7) - (9)) Anlaß zum Gewinnstreben einzelner Unternehmungen innerhalb des Systems. Dieser legitimierte Gewinnanreiz führt, überläßt man das System sich selbst, zu einem ständigen Wachstum der Beträge der Installationen, Energie- und Stoffflüsse. Diese "natürliche" Grundtendenz des Wachstums ist eine Ursache für Zustandsänderungen des Systems.

Eine zweite Ursache besteht in Änderungen der Randbedingungen für das System, z.B. in einer Beschränkung der Import- und Exportmöglichkeiten energietechnisch relevanter Stoffe *). Da solche Änderungen in der Regel zu einer Beeinträchtigung des vorher erläuterten Wachstumsstrends führen, werden sie zumeist als Störungen empfunden. Es bleibt jedoch im Einzelfall zu prüfen, ob dies nur Störungen im Sinne der Ziele von Einzelunternehmungen oder tatsächliche Störungen bei der Erfüllung der Optimierungsmaxime sind.

*) Das bezieht sich nicht nur auf Beschränkungen des Ölimports in ein betrachtetes Versorgungsgebiet sondern auch auf die "Exporte" von Abfallstoffen - z.B. radioaktivem Abfall - aus diesem Gebiet.

Eine dritte Kategorie von Ursachen besteht in Eingriffen staatlicher Organe in das Energie-System (siehe Abb. 1, Bereich (5)). Solche Eingriffe sind notwendig, wenn sich der Zustand des Systems von seiner Bewegung in Richtung auf das Optimum entfernt oder wenn Nebenbedingungen verletzt werden bzw. in Gefahr geraten, in Zukunft verletzt zu werden. Dies kann durch die oben genannten Störungen bewirkt werden, so daß Eingriffe des Staates auch als Reaktionen darauf anzusehen sind. Die Art der Eingriffe des Staates hat sich insbesondere an der Trägheit des Energiesystems und an der Geschwindigkeit der jeweiligen störungsbedingten Zustandsänderung zu orientieren. Kurz- und mittelfristig wirkende Maßnahmen sind der Erlass von Gesetzen oder Gesetzesänderungen - z.B. über Verbrauchsbeschränkungen, Vorratshaltung, Steuern, Subventionen -, langfristig wirkt z.B. die finanzielle Förderung energietechnischer Entwicklungs- und Forschungsarbeiten.

Die staatliche Förderung von Arbeiten an energietechnischen Innovationen ist damit nur eines der Mittel - und zwar das nur langfristig wirkende -, die dem Staat als Eingriffsmöglichkeiten in das Energiesystem zur Verfügung stehen. Um Entscheidungen darüber zu treffen, welche der möglichen Arbeiten gefördert werden sollen, muß im Voraus bekannt sein, wodurch die Erfüllung der Optimierungsaufgabe behindert wird oder werden könnte und in welcher Weise sich die denkbaren energietechnischen Innovationen auf das Energie-System auswirken würden. Es ist deshalb notwendig, das Energie-System derart in mathematischer Weise zu erfassen, daß mögliche zeitliche Verläufe der Zustandsgrößen vorausberechnet werden können. Es ist also ein mathematisches Modell des Energie-Systems anzufertigen.

5. Ein Modell des Gesamtsystems mit besonderer
Detaillierung des Energieteils

5.1 Prinzipieller Aufbau eines statischen Gesamtmodells

Die Überlegungen im Kapitel 3 haben gezeigt, daß das Energiesystem Bestandteil des Gesamtsystems ist und deshalb nicht für sich allein betrachtet werden darf. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, ein Modell des Gesamtsystems entsprechend der in Abb. 1 gezeigten Einteilung in verschiedene Sektoren aufzubauen und dabei den Energieteil besonders weitgehend zu detaillieren. Die Detaillierung kann dabei so weit gehen, wie sie in Tab. 1 vorgenommen ist.

Bei den Kosten ist die Vergleichbarkeit der verschiedenen Bereiche (Bereiche ① ÷ ⑤ in Abb. 1) dadurch gegeben, daß man die Geldwertflüsse aus der Wirtschaftsstatistik ableiten kann. Daher ist auch die Summe der Kosten $\sum_{i=1}^5 K_i$ bestimmbar.

Die Summe der Einzelnutzen $\sum_{i=1}^5 N_i$ ist dagegen nicht direkt angebar, da es nicht möglich ist, die Nutzen aus den einzelnen Bereichen in gleicher Weise zu quantifizieren. Hier muß man sich damit helfen, für jeden Bereich einen Grenzwert $N_{i \text{ min}}$ (im Sinne von Gl. (8)) anzugeben, wobei die Dimensionen der einzelnen Grenzwerte verschieden und damit nicht vergleichbar sein können. Die Nebenbedingung $\sum_{i=1}^5 N_i \geq N_{\text{min}}$ teilt sich damit in fünf einzelne Nebenbedingungen

$$N_i \geq N_{i \text{ min}}, \quad i = 1 \dots 5 \quad (15)$$

auf. Die Überlegungen in Abschnitt 4.2.2 haben gezeigt, daß beim derzeitigen Stand des Wissens der eigentliche Nutzen aus der Verwendung der Nutzenergie nicht bestimmt werden kann, so daß man als Maß für den Nutzen vorerst die Nutzenergie (als reduzierte Zustandsgröße, siehe Abschnitt 4.2.4) heranziehen muß. In analoger Weise muß man auch bei den

anderen Bereichen vorgehen. Dabei kann der Nutzen der Bereiche (1) und (2) (Abb. 1) durch Produktionsziffern gekennzeichnet werden, der des Bereichs (3) durch Umsätze und der des Bereichs (4) durch die Transportleistung (in Personen- und Tonnenkilometer).

Auch beim Risiko muß man sich in allen Bereichen mit den reduzierten Zustandsgrößen (siehe Abschn. 4.2.4) vorerst begnügen. Zum Teil sind das direkt die in Tab. 2 angegebenen Umweltveränderungen, zum Teil können aus den Emissionen über Ausbreitungsrechnungen die entsprechenden Immissionen bestimmt werden. Gerade die Ausbreitung von Emissionen unterstreicht die Bedeutung der Erfassung der Stoffflüsse, da ja auch emittierte Stoffe in betrachtete Regionen "importiert" bzw. daraus "exportiert" werden können.

Diese Überlegung führt auf das grundsätzliche Regionalisierungsproblem, das bei der Struktur des Modells zu berücksichtigen ist. Versucht man, den optimalen Zustand in einem bestimmten Gebiet zu erreichen, so kann dies auch zu Lasten eines anderen Gebietes geschehen, auf das sich die Betrachtung gerade nicht erstreckt. Um möglicherweise daraus resultierende Fehler zu vermeiden, dürfen selbst kleinere Gebiete - wie z.B. ein abgegrenzter Wirtschaftsraum eines Landes - nicht losgelöst von den umgebenden Gebieten betrachtet werden. Ein Modell muß also so aufgebaut sein, daß es außer dem geographischen Bereich, dessen System abgebildet werden soll, auch alle angrenzenden Gebiete zu erfassen gestattet. Die Struktur des Modells sollte daher so sein, daß es auf beliebige Gebiete angewendet werden kann. Bestimmt man also zunächst die Geldwertflüsse sowie - z.B. im Bereich (5) "Energie" - die Energie- und Stoffflüsse für ein bestimmtes Gebiet, dann sind die Import- und Exportwerte dieser Gebiete gleich den Export- und Importwerten der umgebenden Gebiete, denen sich danach wiederum angrenzende Gebiete anschließen, auf die das Modell dann ebenfalls angewendet werden muß. Im Prinzip lassen sich auf diese Weise mit einem Grundmodell beliebig große Gebiete erfassen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß sich beim

Überschreiten von Staatsgrenzen sowohl die dem System zugrundeliegenden wirtschaftspolitischen Gesetze als auch die Grenzwerte für die Nebenbedingungen *) ändern können. Die sich aus wirtschaftspolitischen Gesetzen ergebenden Bedingungen werden als freie Parameter im Modell berücksichtigt, so daß das Modell auch ideologiefrei ist.

Die Form des Randes der einzelnen Gebiete ergibt sich durch die existierenden Verwaltungsbereiche, da nur diese über die als Startwerte benötigten statistischen Daten verfügen **).

Das Gesamtmodell besteht aus einer Geldwertmatrix mit den fünf Sektoren (vgl. auch Abb. 1)

- ① Landwirtschaft; Rohstoffgewinnung; Bauwesen
- ② Güterproduktion
- ③ Dienstleistungen; Handel; Kommunikationswesen
- ④ Verkehrswesen
- ⑤ Energie.

Während die Sektoren ① bis ④ in dieser stark aggregierten Form belassen werden, wird der Bereich ⑤ weitgehend detailliert, z.B. in der in Abb. 2 gezeigten Weise.

Im Bedarfsfall können einzelne Energiesektoren noch weiter

*) Dies äußert sich z.B. in den unterschiedlichen Sicherheitsbestimmungen für kerntechnische Anlagen in den verschiedenen Ländern.

***) Erläuterungen hierzu enthält der Abschnitt 4.7.2 Datenbeschaffung.

untergliedert werden, z.B. wie in Tab. 1. Da diese Matrix in ein Flußdiagramm überführt werden kann - wie im Prinzip im Abschnitt 4.1 gezeigt wurde - sind die Geldwertflüsse innerhalb des gerade betrachteten geographischen Gebietes bekannt. Die den Rand des Gebietes überschreitenden Flüsse sind die Importe und Exporte, die die einzelnen Gebiete miteinander verknüpfen. Die Summe aller Zeilen oder Spalten entspricht dem Bruttosozialprodukt des betrachteten Gebietes. Die Matrix gibt für die Bereiche (1) bis (4) pauschal und für den Bereich (5) weitgehend untergliedert die volkswirtschaftlichen Kosten an, so daß man auch die Relationen der Kosten aus den einzelnen Bereichen erkennen kann.

Auch bei dem Energieteil wird die Struktur aus der Systemanalyse des Kapitels 4 übernommen. Wie dort beschrieben, können aus dem Geldwertflußdiagramm ein Energie- bzw. Exergie- und ein Stoffflußdiagramm abgeleitet werden (Übergang von Abb. 4 nach Abb. 5). Mit diesen Flußdiagrammen, die auch als Matrizen dargestellt werden können, erhält man dann den Nutzenergieverbrauch und die Umweltveränderungen im betrachteten Gebiet. Ein Teil der Emissionen kann mit Ausbreitungsrechnungen in Immissionen in diesem Gebiet umgerechnet werden. Der Übergang von diesen reduzierten Zustandsgrößen auf Nutzen und Risiken verlangt noch umfangreiche Untersuchungen (vgl. auch Abschnitt 4.2.4).

Die Gesamtmatrix und die Flußdiagramme stellen damit ein Gesamtmodell mit einem besonders stark detaillierten Energieteil dar. Dieses Modell gestattet jedoch zunächst nur, einen Zustand des Systems zu beschreiben; es ist also ein statisches Modell. Um den Ablauf von Zustandsänderungen berechnen zu können, muß dieses Modell dynamisiert werden.

5.2 Übergang vom statischen zum dynamischen Modell

In der Vergangenheit ist verschiedentlich versucht worden, statische Modelle - vor allem Energie-Modelle - dadurch zu dynamisieren, daß die in Zukunft zu erwartenden Änderungen und Zustände derjenigen Werte, die für den Startzeitpunkt der Statistik entnommen werden, einfach abgeschätzt wurden. Da solche Abschätzungen *) der persönlichen Einstellung des Schätzers unterliegen, sind die bei solchen "Vorberechnungen" erzielten Ergebnisse eine Abbildung dieser Einstellung, die durch die Verknüpfungen im Modell nur auf ihre innere Konsistenz hin geprüft worden ist. Diese Ergebnisse sagen also höchstens aus, daß die Vorausschätzungen von technisch-physikalischer Seite her nicht unmöglich sind. Damit erklärt sich auch die Unterschiedlichkeit der von Proponenten verschiedener neuer Primärenergiequellen aufgrund von Modellrechnungen gemachten Voraussagen für die zukünftige Entwicklung. Solche Modellrechnungen haben nur pseudodynamischen Charakter und sollen hier nicht betrachtet werden.

Von einem dynamischen Modell wird verlangt, daß es alle Verknüpfungen und Bedingungen enthält, die den zeitlichen Verlauf der Zustandsdaten bestimmen. Parameter des Modells sind dann nur noch die Eingriffe von außen.

Ausgangspunkt für eine Dynamisierung des hier betrachteten Gesamtmodells ist der verlangte Nutzen, für den durch die Nebenbedingungen Gl. (15)

$$N_i \geq N_{i \text{ min}} , \quad i = 1 \dots 5$$

eine untere Grenze vorgegeben ist. Die Tatsache, daß die Quantifizierung des Nutzens derzeit nicht vollständig möglich ist, hatte zur Reduktion dieser Zustandsgröße geführt, im Bereich (5) "Energie" auf die Nutzenergie

*) Die Abschätzung zukünftiger Systemzustände wird auch als "scenario writing" bezeichnet.

(vgl. Abschnitte 5.1 und 4.2.4). Für diesen Bereich beginnt die Dynamisierung mit der Vorgabe einer Funktion $N_{5 \text{ min}} = f(t)$. Diese ist von der Größe der Bevölkerung im betrachteten Gebiet und vom Pro-Kopf-Bedarf an Nutzenergie abhängig *). Weiterhin müssen Daten über die Änderung der spez. Nutzenergiekosten mit zunehmendem kumulierten Verbrauch vorgegeben werden; diese Kostenänderungen werden hauptsächlich von der Primärenergieart bestimmt, da die spez. Kosten für Umwandlungen und Transporte vergleichsweise schwach von der Energiemenge abhängig sind. Insbesondere bei den sich erschöpfenden Mengen fossiler Brennstoffe steigen die Kosten mit der wachsenden insgesamt verbrauchten Menge erheblich [24]. Da Nutzenergie auf einer Vielfalt von Wegen geliefert wird (vgl. z.B. Abb. 4), können die Kosten für dieselbe Nutzenergieart unterschiedlich sein. Aufgrund solcher Kostenunterschiede, die in verschiedenen Gebieten voneinander abweichen können, stellt sich eine bestimmte Kombination von Versorgungswegen ein, der eine bestimmte Zusammensetzung des Primärenergiebedarfs entspricht (im englischen Sprachgebrauch als "energy mix" bezeichnet). Zeitliche Änderungen der Kosten führen sowohl zu Verschiebungen bei den Mengenanteilen der einzelnen Versorgungswege als auch zur Veränderung des Gesamtbetrages der verbrauchten Nutzenergie. Die Reaktion des Verbrauchers auf Kostenänderungen wird durch die sogen. "Preiselastizität" erfaßt. Diese gibt an, um welchen Betrag sich der Verbrauch ändert, wenn die Kosten um eine Einheit variieren. Die mit $N_{5 \text{ min}} = f(t)$ für jeden Zeitpunkt t zunächst vorgegebenen Verbrauchswerte sind also nur Anfangswerte für die Berechnung des Verbrauchs, der sich entsprechend der Preiselastizität einstellt.

*) Die Tatsache, daß sich die Höhe des Pro-Kopf-Bedarfs an Nutzenergie nur mit dem eigentlichen Nutzen fundiert begründen läßt, unterstreicht die besondere Bedeutung von Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Nutzen und Nutzenergie.

Die Geschwindigkeiten, mit der Änderungen der Gesamtmengen und der Mengenanteile der einzelnen Wege stattfinden, sind abhängig von der Höhe der erwarteten Kostenersparnis beim Verbraucher und beim Umwandlungs- und Verteilungsunternehmen sowie von den technischen Möglichkeiten. Im Falle von bereits früher getätigten Vorausinvestitionen ist ein Umschalten bei technischen Anlagen kurzfristig möglich und erfordert weder Betriebsunterbrechung noch erneuten Kapitalaufwand. Ein Beispiel hierfür sind die in manchen konventionellen Dampfkraftwerken vorhandenen Kessel mit Mischfeuerung, die die Verwendung von schwerem Heizöl und Kohlenstaub in beliebigem Verhältnis gestatten und damit ein rasches Anpassen an relative Preisänderungen bei diesen Brennstoffen ermöglichen. Umbauten von Anlagen dagegen erfordern Kapital und zumeist Betriebsunterbrechungen, nehmen also mehr Zeit in Anspruch. Die Reaktionszeiten sind noch länger, wenn geänderte Marktverhältnisse nur bei der Konzeption von neu zu errichtenden Anlagen berücksichtigt werden, weil der Umfang der Neuinstallationen dann abhängig ist von der Menge der zu ersetzenden alten Anlagen und vom Wachstum des Verbrauchs. Noch langfristiger wirken sich Entscheidungen aus, zunächst Forschung und Entwicklung zur Bereitstellung neuen technischen Wissens zu fördern, auf dessen Basis dann neue Anlagen gebaut werden. Zeitlicher Verlauf und Kostenaufwand aller dieser Reaktionen müssen vorkalkuliert werden. Bei besonders lange dauernden Vorgängen - wie z.B. die Erarbeitung neuer Technologien - können keine genauen Werte angegeben werden. Man muß sich in solchen Fällen mit der Angabe von Spannen begnügen, die aus vergleichbaren Entwicklungen früherer Jahre abgeleitet werden können. In dieser Hinsicht kann von der Entwicklung der Kernspaltungsreaktoren sicher auch auf den Weg zum Fusionsreaktor geschlossen werden.

Das im vorangehenden Abschnitt grob beschriebene Modell kann also so erweitert werden, daß auch der zeitliche Verlauf der Zustandsdaten - und damit auch der Einfluß von Parametervariationen darauf - berechnet werden kann.

5.3 Bisherige und laufende Arbeiten zu Modellen dieser Art

5.3.1 Allgemeiner Überblick

Die energiepolitische Situation in den letzten Jahren hat dazu geführt, daß die Arbeiten an Wirtschafts- und Energiemodellen insbesondere in den Industrieländern intensiviert wurden. Einen umfassenden - wenn auch nicht ganz vollständigen - Überblick über die derzeit bestehenden Energiemodelle vermittelt eine vom International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) besorgte Zusammenstellung [25]. Darin sind 69 Modelle aus 21 Ländern mit Kurzbeschreibungen erfaßt. Die Modelle sind entsprechend Tab. 3, die aus [25] entnommen wurde, nach bestimmten Merkmalen geordnet. Mehr als die Hälfte der Modelle (Klassen A und B) beschränkt sich auf die Betrachtung eines Brennstoffes im nationalen und im internationalen Rahmen, bei 17 Modellen (Klassen C und D) werden mehrere Arten von Brennstoffen berücksichtigt, während nur 16 Modelle (Klassen E und F) auch die Verbindung zwischen Energiewirtschaft und Gesamtwirtschaft mit einbeziehen, von denen 4 wiederum wegen ihres internationalen Charakters zu stark aggregiert sind, als daß man sie in diesem Rahmen nutzen könnte. Von den restlichen 12 Modellen der Klasse E verwenden 7 die Input-Output-Struktur, wie sie auch hier (vgl. Abschnitt 5.1) vorgesehen ist, jedoch nur bei einem Modell (JA 4, Japan) ist diese Struktur mit einer dynamischen Rechnung kombiniert worden, allerdings bezieht sich dieses Modell allein auf den Energiebedarf und dessen Aufteilung auf die verschiedenen Verbrauchssektoren. Keines der in [25] beschriebenen Modelle erfüllt also derzeit die Anforderungen, die in den Abschnitten 5.1 und 5.2 formuliert wurden. Dieses Fazit wird auch durch [26] bestätigt, worin als eine der wesentlichen noch ungelösten Aufgaben die Integration von Energiemodellen in dynamische Modelle der Gesamtwirtschaft bezeichnet wird.

Arbeiten hierzu werden derzeit zum Beispiel von Jorgensen und Mitarbeitern an der Harvard University (USA) zusammen mit Hoffman (Brookhaven National Laboratory, USA) durchge-

führt und auch in Zusammenarbeit zwischen der University of Illinois (Center for Advanced Computation) und Hoffman. Bei beiden Arbeitsgruppen besteht das Ziel darin, das sehr detaillierte Energiemodell von Hoffman [27] in das Wirtschaftsmodell von Jorgensen [1] und in das an der University of Illinois entwickelte [4] zu integrieren. Diese Arbeiten sind hier von besonderem Interesse, weil sie den im Abschnitt 5.1 formulierten Vorstellungen entsprechen. Dies gilt in verstärktem Maße für die Kombination des Jorgensen-Modells mit dem von Hoffman, weil beide Modelle gegenwärtig auf die Verhältnisse in der Bundesrepublik übertragen werden [28] und weiterhin von den Autoren neben der Kombination ihrer zunächst noch statischen Modelle auch die Dynamisierung vorgesehen ist [29], womit auch den Vorstellungen von Abschnitt 5.2 entsprochen würde. Beide Modelle und die weiteren geplanten Arbeiten werden deshalb im folgenden kurz beschrieben.

5.3.2 Das Jorgensen-Modell

Im Rahmen dieses Berichts können zur Kennzeichnung der Struktur und der Arbeitsweise dieses Modells nur die wesentlichen Merkmale angegeben werden. Eine ausführliche Beschreibung gibt [1], eine etwas kürzere [30], ein Beispiel seiner Anwendung - für das "Energy Policy Project" der Ford Foundation - wird in [31] beschrieben.

Die Grundstruktur ist durch ein Input-Output-Modell gegeben, mit dem die Verflechtung zwischen Energie- und Nichtenergiesektoren erfaßt wird. Es ist in neun Sektoren unterteilt:

- | | | |
|--|---|-----------------------|
| 1) Landwirtschaft, Rohstoffgewinnung, Bauwesen | } | Nicht-energiesektoren |
| 2) Güterproduktion (ohne Mineralölprodukte) | | |
| 3) Verkehrswesen | | |
| 4) Kommunikationswesen, Handel, Dienstleistungen | | |

- 5) Kohleförderung
 - 6) Rohöl- und Erdgasförderung
 - 7) Mineralölverarbeitung und zugehörige Industrien
 - 8) Elektrizitätsversorgung
 - 9) Gasversorgung .
- } Energie-
sektoren

Nur die Anfangsdaten für die mit diesen Sektoren gebildete Matrix werden der Statistik entnommen und dem Programm von außen vorgegeben; sie werden als sogen. "exogene" Größen bezeichnet. Um den zeitlichen Verlauf der Koeffizienten der Matrix innerhalb des Modells - also "endogen" - zu bestimmen, ist das rein statische Input-Output-Modell um drei sogen. "ökonometrische" Modell-Komponenten ergänzt worden. Diese Komponenten dienen zur Darstellung des Verhaltens der Produzenten und der Konsumenten sowie zur Erfassung der zeitlichen Entwicklung der Gesamtwirtschaft. Sie sind ein erster Schritt zur Dynamisierung des zugrunde liegenden statischen Input-Output-Modells. Von einem insgesamt dynamischen Modell kann jedoch noch nicht gesprochen werden, da in den ökonometrischen Modellkomponenten noch einige Rückkopplungen fehlen.

Das Modell des Produzentenverhaltens bestimmt die Koeffizienten der Input-Output-Matrix für jeden der neuen genannten Sektoren abhängig von den Preisen der Produkte aller Sektoren, dem Preis der Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital sowie den Preisen konkurrierender Importe. Die Zielfunktion der Produzenten ist dabei die Gewinnmaximierung.

Mit dem Modell des Konsumentenverhaltens wird die Aufteilung des privaten Verbrauchs auf die Produkte der neun Sektoren bestimmt. Diese Aufteilung ist abhängig von den Preisen der einzelnen Produktgruppen. Als Zielfunktion dient die Nutzenmaximierung, für die ein besonderer Ansatz hergeleitet wurde.

Die zeitliche Entwicklung der Gesamtwirtschaft wird mit einem sogen. makro-ökonomischen Wachstums-Modell dargestellt, das nur die die Gesamtwirtschaft betreffenden pauschalen Angebots- und Nachfragegleichungen für Konsum, Investitionen und Arbeit enthält. Es ist dynamisiert durch Verbindungen zwischen Investitionen und der Erhöhung des Kapitalbestandes sowie zwischen den Preisen für Kapitaldienst und Änderungen in den Preisen für Investitionsgüter. Das Ergebnis von Rechnungen mit diesem Modell ist der zeitliche Verlauf der Produktion von Konsum- und Investitionsgütern, des Volkseinkommens und des Brutto-sozialprodukts in absoluten und relativen Preisen.

Um mit dem aus den beschriebenen Komponenten bestehenden Gesamtmodell detailliertere Aussagen über den Energiebereich zu erhalten, wird die bisherige Aufteilung in fünf Sektoren durch die im Hoffman-Modell gewählte Aufteilung ersetzt. Zum besseren Verständnis wird dieses deshalb im folgenden kurz erläutert.

5.3.3 Das Hoffman-Modell

Der Zweck dieses Modells, seine Struktur sowie die Art der benötigten Eingabedaten und der Ergebnisse sind in einem Schema zusammengefaßt, das aus [25] entnommen und diesem Bericht als Anhang beigefügt wurde. Eine ausführliche Beschreibung gibt der Autor in [27], eine etwas kürzer gefaßte mit einem Ausblick auf geplante Erweiterungen ist in [32] enthalten. Ein Beispiel für die Benutzung des Modells wird in [33] erläutert.

Es handelt sich um ein lineares statisches Modell, mit dem der Zustand des Energiesystems durch die über ein Jahr integrierten Energieflüsse, Kosten und Auswirkungen auf die Umwelt beschrieben wird. Grundlage dazu ist eine Matrix mit 13 Versorgungskategorien und 15 Bedarfskategorien, die jeweils auch Zwischenenergieformen mit einschließen (siehe Tab. 4). Insgesamt werden also 13 x 15 verschiedene Kombinationen auf dem Wege

von der Gewinnung der Primärenergie über Umwandlungen, Speicherung, Transport und Nutzung bis zur Nutzenergie erfaßt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Unterscheidung von Spitzen-, Mittel- und Grundlastanlagen für die Stromerzeugung, die es gestattet, auch den im zeitlichen Verlauf variierenden Bedarf - zum Beispiel ausgedrückt durch die geordnete Jahresbelastungskurve - zu berücksichtigen. Diese Unterscheidung, die auch auf die Wärmeversorgung ausgedehnt werden könnte, ist deshalb so wichtig, weil die zeitliche Änderung des Bedarfs im Verlauf eines Tages oder eines Jahres das Energiesystem wesentlich prägt. Sowohl technische Neuerungen bei Umwandlungsanlagen und Energiespeichern als auch die Verwendbarkeit bisher praktisch nicht genutzter Primärenergiearten, wie z.B. der Sonnenenergie, können nur dann realistisch beurteilt werden, wenn man die zeitlich unterschiedlichen Verläufe innerhalb des betrachteten Zeitraums auf der Angebots- und der Bedarfsseite mit in die Betrachtung einbezieht. Modelle, in denen dies nicht geschieht, können deshalb kaum relevante Aussagen z.B. über die Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Nutzung der Sonnenenergie liefern.

Die im Modell durch die physikalischen und technischen Gegebenheiten bedingten Verknüpfungen sind ein Teil der Nebenbedingungen, unter denen eine Optimierungsrechnung durchgeführt werden kann. Im Regelfall ist die Zielfunktion dabei die Kostenminimierung, während als zusätzliche Nebenbedingungen die Deckung des Bedarfs sowie das Nichtüberschreiten der verfügbaren Primärenergien und der Umweltstandards gefordert werden. Es ist jedoch auch möglich, bei gegebenen Kostengrenzen und Umweltstandards den Primärenergieeinsatz zu minimieren oder weiterhin bei gegebenen Grenzen für Kosten und verfügbare Primärenergien die Belastung der Umwelt zu minimieren. Die in den verschiedenen Optimierungsfällen notwendigen Grenzdaten müssen von außen vorgegeben werden; dazu zählt auch der Bedarf, der allerdings z.B. über die Menge der zu beheizenden Wohnungen, die Anzahl der Personenkilometer oder die

Stahlproduktion bestimmt wird. Die insgesamt notwendigen Daten - z.B. über technische Gegebenheiten wie Umwandlungswirkungsgrade - sind in einem gesonderten Programm gespeichert, der EMDB-Energy Model Data Base [34].

Prognosen über die weitere Entwicklung des Energiesystems können mit diesem Modell nicht gewonnen werden. Man kann höchstens die von außen vorgegebenen (= exogenen) Größen anhand anderer Zusammenhänge für spätere Zeitpunkte - z.B. für das Jahr 2000 - abschätzen und dafür dann den optimalen Zustand bestimmen. Energietechnische Innovationen können berücksichtigt werden, indem dem Modell entsprechend geänderte Daten - z.B. über Wirkungsgrade - eingegeben oder der Matrix neue Wegkombinationen für den Energiefluß hinzugefügt werden. Der Verlauf einer Entwicklung, wie sie die Einführung eines neuen Kraftwerktyps darstellt, kann jedoch nicht dargestellt werden.

Der einer Optimierungsrechnung zugrundegelegte geographische Bereich kann sowohl eine wirtschaftliche Einheit - wie einen Staat - umfassen als auch eine beliebige Region innerhalb eines Staates. Eine weitere Regionalisierung - z.B. zur Hilfe bei der Standortsuche für Kraftwerke - ist in diesem Modell nicht vorgesehen, erscheint im Prinzip jedoch durchführbar, wenn die entsprechenden Daten dafür zu beschaffen sind. Ein Beispiel für die Darstellung der über das Jahr 1969 integrierten Energieflüsse der USA zeigt Abb. 7, die aus [12] entnommen wurde.

5.3.4 Das kombinierte Hoffman-Jorgensen-Modell

Das Hoffman-Modell wird derzeit als Detaillierung des Energieteils in das umfassendere Jorgensen-Modell integriert [29]. Dabei werden zunächst die statischen Versionen, wie sie in den vorangehenden Abschnitten beschrieben wurden, verwendet. Jeder der Autoren ist außerdem dabei, sein Modell zu dynamisieren, und es

ist geplant, daraus dann ein kombiniertes dynamisches Modell zusammenzustellen. Nach den Vorstellungen von Jorgensen [29] soll dies bis Ende 1976 geschehen sein. Dabei liegen den Modellen Daten und Verhältnisse der USA zugrunde. Die Anwendung der Modelle auf andere Länder setzt voraus, daß die notwendigen statistischen Daten in gleicher Weise vorliegen oder das Modell entsprechend geändert wird und daß das in einem anderen Land auch andere Verhalten von Konsumenten und Produzenten im Modell berücksichtigt wird.

Parallel zu den in den USA weiterlaufenden Arbeiten werden derzeit die statischen Versionen beider Modelle auf die Verhältnisse der Bundesrepublik übertragen. Über die am Jorgensen-Modell dabei notwendigen Änderungen wird in [30] berichtet. Dabei wird die Einteilung in die verschiedenen Sektoren den Statistiken des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, Berlin, angepaßt. Die sich daraus ergebende Input-Output-Matrix einschließlich der Quellen für die notwendigen Daten ist Tab. 5 zu entnehmen.

Die Struktur der beiden Modelle bleibt bei der Übertragung unverändert. Deshalb entspricht das kombinierte Modell den in den Abschnitten 5.1 und 5.2 entwickelten Vorstellungen zwar weitgehend, jedoch nicht vollständig. Die noch notwendigen Änderungen und Ergänzungen werden im folgenden Abschnitt zusammengestellt.

5.4 Noch notwendige Arbeiten

Die Änderungen und Ergänzungen erstrecken sich auf zwei Gebiete, die getrennt voneinander bearbeitet werden können. Die erste Aufgabe besteht darin, das Modell so zu vervollständigen, daß die Verteilung der reduzierten Zustandsgrößen des Energie-Systems (siehe Abschnitt 4.2.4) und der anderen Systeme über dem jeweils betrachteten Gebiet bestimmt werden kann sowie auch die Änderungen dieser Verteilungen abhängig von der Zeit. Außerdem

müssen Grenzwerte für die reduzierten Zustandsgrößen vorgegeben werden. Ist die Kostenminimierung die Zielfunktion für die optimale Gestaltung des Systems, dann sind die Grenzwerte ein Teil der Nebenbedingungen. Die zweite Aufgabe besteht darin, den Übergang von den in den einzelnen Bereichen unterschiedlichen reduzierten Zustandsgrößen (vgl. Abschn. 5.1) auf die allgemeinen Zustandsgrößen - Kosten, Nutzen und Risiken - zu ermöglichen und auch für diese Größen Grenzwerte herzuleiten.

5.4.1 Vervollständigung des Gesamtmodells

Neben der bereits angelaufenen Übertragung der statischen Modelle von Jorgensen und Hoffman auf die Verhältnisse in der Bundesrepublik sowie die notwendige Aufbereitung der statistischen Daten [28], [30] sind auch die Kombination und die Dynamisierung dieser beiden Modelle in dem Maße, in dem sie in den USA durchgeführt werden, in die bereits übertragenen Modelle zu übernehmen. Das erfordert eine dauernde Pflege dieser Modelle in der Bundesrepublik und einen ständigen engen Kontakt zu Jorgensen und Hoffman. Aus den Zeitvorstellungen Jorgensens [29] kann geschlossen werden, daß das kombinierte dynamische Modell kaum vor Ende 1976 in den USA fertiggestellt sein kann, in der Bundesrepublik also entsprechend später.

Das dann verfügbare Gesamtmodell erfüllt die in den Abschnitten 5.1 und 5.2 formulierten Forderungen jedoch noch nicht vollständig. Es ist nur in dem geographischen Bereich gültig, in dem die im Modell enthaltenen Wirtschaftsgesetze und Verhaltensweisen von Produzenten und Konsumenten gelten, in der Regel also für eine bestimmte Volkswirtschaft. Um es z.B. auf die gesamte Europäische Gemeinschaft anwenden zu können, müssen entsprechende Unterschiede als Daten eingegeben werden können. Das Gesamtmodell muß also in diesem Sinne geändert werden, was bereits parallel zur Übertragung von US- auf deutsche Verhältnisse geschehen könnte.

Weiterhin ist die Struktur des Gesamtmodells zunächst so, daß das betrachtete geographische Gebiet - z.B. ein Staat - nicht in einzelne Regionen unterteilt werden kann. Da die örtliche Dichte der Aktivitäten in den Bereichen (1) ÷ (5) (vgl. Abb. 1) je nach den Gegebenheiten recht unterschiedlich sein kann, muß das Modell so geändert werden, daß innerhalb eines Staates zunächst ein einzelnes Gebiet allein und danach die angrenzenden Gebiete betrachtet werden können, wobei die Exporte und Importe über die Gebietsränder jeweils die Anschlußdaten darstellen. Das Gesamtmodell muß also auf eine beliebig gestaltige Region anwendbar sein, wenn nur die statistischen Daten als Anfangswerte zur Verfügung stehen (vgl. auch Abschnitt 5.1).

Das Gesamtmodell erfaßt im Sinne der Vergleichbarkeit der Bereiche (1) bis (5) Geldwertflüsse, innerhalb des detaillierteren Energieteils daneben auch Energieflüsse. Da die Mehrzahl der Aktivitäten in den einzelnen Bereichen auch mit Stoffumwandlungen verbunden ist und die Emission von Stoffen in die Umgebung in Bezug auf das später zu bestimmende Risiko eine entscheidende Rolle spielt, muß dem Modell noch die Berechnung der Stoffflüsse hinzugefügt werden. Dabei sind nicht nur die im Normalfall auftretenden Emissionen zu berücksichtigen, sondern auch diejenigen, die in größeren Zeitabständen vorkommen oder vorkommen können - z.B. bei der Stilllegung von Energieumwandlungsanlagen oder bei Störfällen. Mit dem Stoffflußdiagramm werden dann alle Im- und Exporte energierelevanter Stoffe einschließlich der Stoffumwandlungen und der Bestandsveränderungen im betrachteten Gebiet erfaßt. Damit ist dann auch gleichzeitig der Beitrag dieser Stoffe zum gesamten Gütertransport gegeben, der dieses Gebiet belastet.

Auf der Basis des Geldwertflußdiagramms sind dann die reduzierten Zustandsgrößen für alle Bereiche (1) bis (5) zu bestimmen. Die Kosten können jeweils direkt aus den Geldwertflüssen entnommen werden. Die reduzierten Größen für den Nutzen und die Umweltbeeinträchtigungen werden in den einzelnen Bereichen auf unterschiedliche

Weise bestimmt. Die in den Bereichen ① bis ④ dazu notwendige Vorgehensweise (vgl. auch Abschn. 5.1) ist in einer gesonderten Studie zu erarbeiten und danach in das Gesamtmodell als Rechenvorschrift einzufügen. Im Bereich ⑤ "Energie" sind Energie- und Stoffflußdiagramm Ausgangspunkt für die Bestimmung der reduzierten Zustandsgrößen Nutzenergie und Umweltveränderungen (vgl. Abschnitt 4.2.4). Ein wesentlicher Teil dieser Veränderungen wird durch die Emission von Stoffen und Energie (vgl. Tab. 2) verursacht. Ein Maß für die Belastung der Umwelt sind die daraus resultierenden Immissionen. Um die örtliche Verteilung der Immissionen berechnen zu können, müssen dem Gesamtmodell Berechnungsverfahren für die Ausbreitung der emittierten Stoffe und Energien hinzugefügt werden.

Mit den beschriebenen Änderungen und Ergänzungen erfüllt das Gesamtmodell die Forderung, die Berechnung der reduzierten Zustandsgrößen in ihrer örtlichen Verteilung über einer beliebigen Region zu ermöglichen. Trotz der hier vorgeschlagenen Verwendung der Modelle von Jorgensen und Hoffman ist es notwendig, die Arbeiten anderer an energieorientierten Wirtschaftsmodellen zu verfolgen. Beispiele hierfür sind die in [25] nicht mit erfaßten Arbeiten von Thoss [35] und - darauf aufbauend - von Döllekes [36], die ebenfalls von einem Input-Output-Ansatz ausgehen, oder die Arbeiten am M.I.T. Energy Laboratory, über die in [37] berichtet wird.

5.4.2 Übergang auf die allgemeinen Zustandsgrößen

Die Notwendigkeit, den Zustand des Energiesystems gegenwärtig nur mit den reduzierten Zustandsgrößen zu beschreiben, ist im Abschnitt 4.2 begründet worden. Dies gilt auch für die anderen Bereiche des Gesamtsystems.

Eine wesentliche Aufgabe besteht darin, den Nutzen aus den Aktivitäten in den Bereichen ① bis ⑤ so zu definieren, daß er für alle Bereiche in gleicher Weise quanti-

fiziert und dann auch miteinander verglichen werden kann. Die dazu notwendigen Arbeiten sind heute nicht klar zu übersehen, so daß diese zunächst definiert werden müssen.

Die zweite wesentliche Aufgabe erstreckt sich auf die Bestimmung der Risiken, die mit den Aktivitäten in den fünf Bereichen verbunden sind. Auch diese Risiken müssen gleichartig quantifiziert werden, damit sie untereinander vergleichbar sind. Über die Risiken aus dem Energiebereich ist bereits im Rahmen der Grobanalyse des Energie-Systems (Abschnitt 4.2.3) einiges gesagt worden. Im Zusammenhang mit der kommerziellen Verwendung der Kernspaltungsenergie sind eine Vielzahl von Untersuchungen zu diesem Problem begonnen worden. Bisherige Ergebnisse sind jedoch häufig von vorgefaßten Meinungen geprägt gewesen, so daß es notwendig ist, zunächst die Methodik der Risikobestimmung auf eine fachlich fundierte Grundlage zu stellen. Wegen der Weite dieses Gebietes kann im Rahmen dieses Berichts hierauf nicht im Detail eingegangen werden.

Wenn die in diesem Abschnitt nur pauschal definierten Aufgaben gelöst sind und die Nutzen- und Risikobestimmung in das Gesamtmodell integriert sind, ist es möglich, die örtliche Verteilung von Kosten, Nutzen und Risiko über einem beliebigen Gebiet ausgehend von einem bestimmten statistisch erfaßten Zeitpunkt als Funktion der Zeit zu berechnen.

6. Grenzwerte für die Nebenbedingungen

Das Modell zur Beschreibung des Systemzustandes als Funktion der Zeit ist kein Selbstzweck. Es ist vielmehr ein Hilfsmittel zur Untersuchung des Systemverhaltens - in welcher Weise sich z.B. wirtschafts-, energie- oder forschungspolitische Entscheidungen auswirken oder wie empfindlich der Systemzustand auf Störungen von außen reagiert. Weiterhin ermöglicht ein Modell nach Vorgabe von Zielfunktion und Nebenbedingungen, diejenigen Maßnahmen herauszufinden, die

das reale System seinem optimalen Zustand näherbringt. Bei der Definition von Zielfunktion und Nebenbedingungen (vgl. Abschn. 3) für das Gesamtsystem kann die Nutzenmaximierung unter Einhaltung einer Obergrenze für Kosten und Risiken gefordert werden oder die Kostenminimierung bei vorgegebenen Werten für Mindestnutzen und maximales Risiko.

Die letztgenannte Definition verlangt die Vorgabe von Grenzwerten für Nutzen und Risiko. Wegen der derzeit noch fehlenden Möglichkeit zur exakten Quantifizierung dieser Begriffe (vgl. Abschn. 5.4.2) muß man in allen Bereichen (① bis ⑤) Grenzwerte für die jeweils definierten reduzierten Zustandsgrößen vorgeben. Da über diese reduzierten Größen in den Bereichen ① bis ④ nicht mehr bekannt ist, als das in Abschnitt 3 Gesagte, werden im folgenden die Grenzwerte nur für den Bereich ⑤ "Energie" ausführlicher behandelt. Hier müssen Mindestwerte für die Nutzenergie und Höchstwerte für die Umweltveränderungen - i.w. für die Immissionen (siehe Tab. 2) - in ihrer Verteilung über dem gerade betrachteten Bereich angegeben werden.

6.1 Mindestwerte für die Nutzenergie

Als Nutzenergie waren im Zusammenhang mit Abb. 2 die thermische Energie im Niedertemperaturbereich (NT), die mechanische und die Lichtenergie (alle für direkte Nutzung) sowie der Energieanteil an Konsumgütern (für indirekte Nutzung) definiert worden.

Die in einem bestimmten Gebiet konsumierten Güter "enthalten" soviel Energie, wie im Verlauf der gesamten Produktion und des Transportes (anteilig auch über Investitionsgüter) aufgewendet wurde. Bereits im Abschnitt 4.2.1 wurden Arbeiten zitiert ([4] bis [10]), die sich mit der Bestimmung des Energieaufwandes für die Güterproduktion beschäftigen. Der für ein Produkt oder eine Produktgruppe aufgewendete Energiebetrag ist abhängig von den relativen Kosten der verschiedenen Produktionsfaktoren - Kapital, Arbeit, Energie -, da

die Produktion im betriebswirtschaftlichen Sinne optimiert wird. In [4] wurde gezeigt, daß sich dieser Energiebetrag mit der Zeit so wenig ändert, daß er bei der Bestimmung von Mindestbeträgen als konstant angenommen werden muß. Vielmehr kann man die Mindestwerte für indirekten Nutzenergiebedarf nur auf einer Auswahl verschiedener Produkte mit unterschiedlichem Energieanteil basieren. Art und Menge der Produkte richten sich nach der Lebensnotwendigkeit. Da der Übergang von "lebensnotwendig" nach "luxuriös" nicht objektivierbar ist, sollte er durch Abstufung von Art und Menge der Produkte selbst definiert werden. Welche dieser Stufen dann der Bestimmung eines unteren Grenzwertes für den indirekten Nutzenergiebedarf - im Sinne eines "Existenzminimums" - zugrundegelegt wird, ist Sache einer für das Energiesystem von außen kommenden Entscheidung. Innerhalb des oben definierten Übergangsbereiches ist der untere Grenzwert für den indirekten Nutzenergiebedarf ein variabler Parameter, der durch einen wahrscheinlichen Wert und eine zugehörige Toleranzbreite definiert ist. Um die entsprechenden Zahlenwerte zu bestimmen, müssen Arbeiten wie [4] durch Zusammenstellung verschiedener Kombinationen von Produkten oder Produktgruppen ergänzt werden.

Über den direkten Nutzenergiebedarf des Verbrauchers - i.e. im wesentlichen der Haushaltsbedarf - gibt es bisher nur für einzelne Nutzungsarten vollständige Untersuchungen, da die meisten Arbeiten über Energiebedarf bei der Endenergie (das ist die Energie, die dem Haushalt zugeführt wird) enden und die Nutzenergieausbeute nicht mit betrachten. Vielmehr ist es notwendig, zunächst den eigentlichen Bedarf an Niedertemperaturwärme, mechanischer und Lichtenergie für den direkten Konsum zu erfassen. Auch hierbei besteht das Problem, daß ein absoluter Wert für ein "Existenzminimum" nicht in objektiver Weise feststellbar ist. Für die drei genannten Nutzenergiearten sind deshalb wahrscheinliche Werte und Toleranzbereiche anzugeben. Die Nutzungsinstallationen selbst sind Bestandteile des Energiesystems und tragen zur Vielfalt der möglichen Wege

zwischen Primär- und Nutzenergie bei. Auch die Frage, inwieweit kurzzeitige Unterschreitungen der Toleranzgrenzen (z.B. bei Störungen) zumutbar sind, ist zu untersuchen, kann aber in diesem Rahmen nicht behandelt werden.

Damit können spezifische Minimalwerte für den Nutzenergiebedarf - pro Haushalt oder pro Kopf der Bevölkerung - insgesamt und aufgeschlüsselt nach indirektem und direktem Bedarf, letzterer weiterhin nach Energiearten unterteilt, angegeben werden. Ihre Verteilung über ein geographisches Gebiet ergibt sich dann mit der Dichte der Haushalte oder der Bevölkerung.

6.2 Obergrenzen für die Umweltveränderungen

Bei den Umweltveränderungen, die aus Aktivitäten im Energie-System resultieren, wird nach Tab. 2 zwischen der Inanspruchnahme von Grundfläche und Raum für energietechnische Anlagen und umgebende Schutzbereiche einerseits sowie Emissionen bzw. Immissionen von Stoffen und Energie andererseits unterschieden.

Die Inanspruchnahme von Grundfläche und Raum beeinträchtigt den Menschen auf direkte Weise nur in ästhetischer Hinsicht, während auf indirektem Wege Beeinträchtigungen dadurch eintreten können, daß die Aktivitäten in den anderen Bereichen (① bis ④) behindert werden können. Da eine ästhetische Belästigung nicht quantifizierbar ist, kann sie auch nicht durch bestimmte Werte für Inanspruchnahme von Grundfläche und Raum begrenzt werden. Nur bezüglich der indirekten Auswirkungen sind solche Werte wichtig, z.B. bei Sonnenenergiekollektoren, deren Oberfläche pro Anlage in der Größenordnung von Quadratkilometern liegen kann.

Die wesentlichen Umweltveränderungen werden durch die Emissionen aus allen Teilen des Energie-Systems bewirkt. Jede Einheit der drei Nutzenergiearten ist - abhängig von ihrem Produktions- und Transportweg - mit einer Reihe

von Emissionen behaftet, aus denen sich für die Umgebung Immissionen ergeben. Die Grenzwerte für diese Immissionen resultieren aus den Auswirkungen, die die in der Umgebung ausgebreiteten Stoffe und Energien direkt oder indirekt auf den Menschen haben. Welcher Art diese Auswirkungen sind, wurde bereits im Abschnitt 4.2.3 erläutert. Die Notwendigkeit der Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Immissionen und Risiko besteht auch bei der Komplettierung des Gesamtmodells (siehe Abschn. 5.4.2). Auf der Basis bisheriger Arbeiten über diesen Zusammenhang hat man für nicht radioaktive Stoffe obere Grenzwerte für die maximale Immissionskonzentration in Luft und Wasser - sogen. MIK-Werte - festgelegt [38], bei radioaktiven Stoffen sind für die einzelnen Isotope maximal zulässige Konzentrationen - sogen. MZK-Werte - in Luft und Wasser definiert. Diese sind in der 1. Strahlenschutzverordnung [39] für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland gesetzlich fixiert, sie lehnen sich eng an die Empfehlungen der ICRP [40] an. Allerdings gibt es neuere Untersuchungen (siehe z.B. [41]), die eine Absenkung dieser MZK-Werte geraten erscheinen lassen. Über die kombinierten Auswirkungen verschiedener Stoffe ist bisher wenig bekannt. Eine demnächst stattfindende Konferenz [42] wird Aussagen über den Wissensstand auf diesem Gebiet erlauben.

Die Grenzwerte dürfen bei allen energietechnischen Anlagen nicht nur im Normalbetrieb sondern auch in Störfällen nicht überschritten werden. Die Frage, ob solche Grenzwertüberschreitungen völlig unmöglich sein müssen oder mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zugelassen werden können oder müssen, wird z.B. im Zusammenhang mit der Nutzung der Kernspaltungsenergie - Kernkraftwerke, Brennstofftransporte, Wiederaufarbeitung der Brennelemente, Abfallagerung - diskutiert, ist jedoch bisher unbeantwortet. Je nach den Auswirkungen, die die einzelnen freigesetzten Stoffe auf die Menschen haben, werden die Toleranzbereiche um diese Grenzwerte unterschiedlich groß sein. Je weniger über die Auswirkungen eines Stoffes bekannt ist, desto kleiner müssen Grenzwert und Toleranzbereich sein.

6.3 Noch notwendige Arbeiten

Die beiden vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, daß die Grenzwerte für die Nebenbedingungen derzeit nur auf dem Niveau der reduzierten Zustandsgrößen angegeben werden können. Aber auch diese Angaben sind in manchen Fällen wegen der geringen Kenntnis der Auswirkungen nicht ausreichend fundiert, so daß sie einem Streit der Meinungen unterliegen *). Fundierte Aussagen werden erst dann möglich sein, wenn man den Zusammenhang zwischen den reduzierten und den allgemeinen Zustandsgrößen - Nutzenergie und Nutzen sowie Immissionen und deren Auswirkungen bzw. Risiken - genauer untersucht hat. Solche Arbeiten wurden bereits im Abschnitt 5.4 verlangt. Da diese voraussichtlich noch viel Zeit und Aufwand erfordern werden, muß man sich in der Zwischenzeit mit Grenzwerten für die reduzierten Zustandsgrößen helfen.

Dazu ist es notwendig, den Nutzenergiebedarf zu analysieren. Ausgangspunkt hierfür sind die Unterteilungen in direkten und indirekten Bedarf, die jeweils noch weiter aufgeschlüsselt werden müssen. Ansatzpunkte und Literaturhinweise sind Abschnitt 6.1 zu entnehmen. Die Analyse des Bedarfs ist Teil der Energiesystem-Analyse, die Zusammenstellung verschiedener Produktkombinationen zur Erfassung von Grenzwerten oder Grenzbereichen im Sinne eines Energieexistenzminimums verlangt auch wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Untersuchungen. Der absolute Bedarf ist in Katasterform darzustellen.

Die Festlegung von Grenzwerten für Immissionen dagegen geht weit in den biologisch-medizinischen Bereich, so daß eine weitgehende Beobachtung und Auswertung von Arbeiten aus

*) Dies zeigte z.B. der Verlauf der öffentlichen Anhörung des Innenausschusses des Bundestages zum Thema "Das Risiko Kernenergie" am 2. und 3.12.1974.

diesem Bereich notwendig ist. Entsprechend dem Fortgang dieser Arbeiten können die Grenzwerte für jeden einzelnen Stoff schrittweise korrigiert werden. Für Sonderfälle, bei denen die Überschreitung der Grenzwerte in bestimmten geographischen Bereichen prinzipiell nicht ausgeschlossen werden kann - wie z.B. bei Anlagen zur Nutzung der Kernspaltungsenergie - ist die Wahrscheinlichkeit für solche Überschreitungen abzuschätzen, und es sind deren Konsequenzen zu bestimmen. Ist die Bevölkerung eines bestimmten Gebietes nicht bereit, das Risiko dieser Konsequenzen einzugehen, dann muß die Wahrscheinlichkeit solcher Grenzwertüberschreitungen gleich Null sein; d.h. es dürfen entsprechende Anlagen nicht installiert werden. Die Immissionsgrenzwerte und ihre Toleranzen können also in größeren Gebieten von Ort zu Ort verschieden sein, so daß auch für diese Werte ein Kataster aufgestellt werden muß. Ansätze zur Bearbeitung dieser Fragen bieten Betrachtungen über Stoffbilanzen [43] (darin weitere Literaturangaben) und Gedanken über die Definition von Umweltstandards [44].

7. Mögliche Untersuchungen mit Hilfe des Gesamtmodells

7.1 Überblick

Insgesamt können drei Arten von Untersuchungen mit dem Modell durchgeführt werden: Zunächst kann der zeitliche Verlauf der Zustandsgrößen des gesamten Systems für den Fall berechnet werden, in dem der Staat nicht in das System eingreift. Bei der zweiten Art der Untersuchungen werden die zeitlichen Verläufe der Zustandsgrößen für jeden einzelnen denkbaren staatlichen Eingriff berechnet. Die dritte Gruppe von Untersuchungen hat zum Ziel, die optimale Kombination der staatlichen Maßnahmen unter der vorgegebenen Zielfunktion und den Nebenbedingungen zu bestimmen. Diese drei Arten von Studien werden im folgenden etwas ausführlicher beschrieben.

7.1.1 Simulation des Systemverhaltens ohne staatliche Eingriffe

Der Begriff "ohne staatliche Eingriffe" bedeutet, daß die zum Startzeitpunkt geltenden Gesetze und Verordnungen bestehen bleiben und keine neuen erlassen werden. Der Staat überwacht nur die Einhaltung dieser gesetzmäßigen Grundlagen. Das Modell simuliert damit das Verhalten des Systems, das im Rahmen dieser Grundlagen sich selbst überlassen bleibt. Systeminterne Vorgänge bestimmen den zeitlichen Verlauf der Zustandsgrößen allein, solange sich die Randbedingungen nicht ändern. Bestimmend für das Verhalten der einzelnen Unternehmungen innerhalb des Systems sind betriebswirtschaftliche Überlegungen. Dabei ist es durchaus möglich, daß diese auch einen gewissen Aufwand z.B. für Forschung und Entwicklung zulassen, sofern dieser auch mit einiger Sicherheit zu einem betriebswirtschaftlich meßbaren Erfolg führt.

Als Randbedingungen sind diejenigen Größen anzusehen, die vom System aus nicht maßgebend beeinflußt werden können ("exogene Größen"). Für den Energieteil sind das zum Beispiel die Importmöglichkeiten von Brennstoffen überhaupt sowie die Abhängigkeit der Kosten oder der Güte von der kumulierten Importmenge, oder auch Exportmöglichkeiten von Abfallstoffen aus dem gerade betrachteten geographischen Gebiet. Die Zustandsgrößen sind zunächst unter Konstanthaltung solcher Randbedingungen abhängig von der Zeit zu berechnen und den Grenzwerten für die Nebenbedingungen (siehe Abschn. 6) gegenüberzustellen. Als nächstes sind dann die Auswirkungen von Änderungen dieser Randbedingungen zu untersuchen. Bei den oben genannten Beispielen können solche Änderungen in politisch bedingten Kostensteigerungen oder plötzlichen Lieferbeschränkungen bei Brennstoffen bestehen, oder es kann der Export von Abfallstoffen - z.B. radioaktiven Stoffen - aus dem betrachteten Gebiet begrenzt oder unmöglich werden. Insbesondere ist dabei der Zeitpunkt des Eintritts solcher Änderungen zu variieren.

Weiterhin sind außer den jeweiligen einzelnen Änderungen auch Kombinationen von Änderungen zu beliebigen Zeitpunkten als Störung in das Modell einzugeben und die Empfindlichkeit zu bestimmen, mit der die Zustandsgrößen darauf reagieren. Auch hier müssen diese Größen dann mit den Grenzwerten für die Nebenbedingungen verglichen werden. Dieser Vergleich ist nicht nur in dem Bereich notwendig, dessen Randbedingungen sich änderten - bei den hier genannten Beispielen der Bereich ⑤ "Energie" - sondern auch für die anderen Bereiche.

Die Summe der Ergebnisse dieser Untersuchungen charakterisiert dann das Eigenverhalten des Modells und damit auch das Verhalten des mit dem Modell simulierten Systems. Insbesondere kann dabei gezeigt werden, auf welche Störungen das System sehr empfindlich negativ - im Sinne der Zielfunktion und der Grenzwerte für die Nebenbedingungen - reagiert.

7.1.2 Bestimmung der Auswirkungen staatlicher Maßnahmen

Wie bei der eben beschriebenen Bestimmung des Eigenverhaltens, so werden auch hier die Randbedingungen zunächst konstant gehalten und später variiert, und auch die zeitlichen Verläufe der Zustandsgrößen werden wiederum den Grenzwerten für die Nebenbedingungen gegenübergestellt. Abweichend vom vorhergehenden Abschnitt werden jetzt staatliche Eingriffe in das System mit dem Modell simuliert.

Staatliche Eingriffe sind in allen Bereichen des Gesamtsystems möglich. Im Rahmen dieses Berichtes werden jedoch nur Eingriffe in den Bereich ⑤ "Energie" betrachtet. Dabei handelt es sich um Maßnahmen, die die Energiewirtschaft direkt und indirekt betreffen, und um Förderungen von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Energietechnik. Auf die Energiewirtschaft kann der Staat über Änderungen oder Erlassen von

Gesetzen und Verordnungen einwirken. Beispiele für direkte Einwirkung sind die gezielte Förderung von Investitionen für bestimmte Anlagen (z.B. Steinkohlekraftwerke), die Abdeckung von Risiken, die aus hohen und langfristigen Vorausinvestitionen resultieren (z.B. das Erschließen neuer Braunkohlengruben), die Beschränkung von Importmengen (z.B. bei Steinkohle), die Besteuerung von Brennstoffen (z.B. die Heizölsteuer) oder auch die Verbrauchsbeschränkung (z.B. Sonntagsfahrverbote für Kraftfahrzeuge). Ein Beispiel für die indirekte Einwirkung ist die Festlegung von Grenzwerten für die Emissionen an Kraftwerksanlagen; dieser Punkt wird jedoch erst im nächsten Abschnitt behandelt. Die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Energietechnik geschieht durch Finanzierung eines Teils der Industrieforschung sowie von Arbeiten in Hochschul- und hochschulfreien Instituten. Zur Bestimmung der Auswirkungen solcher Förderungen ist das Ziel der entsprechenden Arbeiten als erreicht anzunehmen und die damit ermöglichte energietechnische Innovation als neues Element der Matrix (vgl. Abb. 2) hinzuzufügen.

Die Auswirkungen jeder einzelnen Maßnahme auf die zeitlichen Verläufe der Zustandsdaten sind anhand des Gesamtmodells zu bestimmen. Dabei ist auch der zeitliche Ablauf solcher Auswirkungen von besonderer Bedeutung. Maßnahmen im Rahmen der Energiewirtschaft wirken sich meistens schneller aus als z.B. die Förderung der Energieforschung. Die Auswahl der Kombinationen von Maßnahmen nach Art und zeitlicher Folge ist eine Frage der Optimierung.

7.1.3 Bestimmung der optimalen Kombination staatlicher Maßnahmen

Die Optimierungsaufgabe ist durch die Zielfunktion und die Nebenbedingungen formuliert. Aus den vorangegangenen Untersuchungen sind das Eigenverhalten des Systems und die Möglichkeiten zur staatlichen Einflußnahme sowie deren Auswirkungen bekannt. Damit ist es zunächst einmal möglich,

alle diejenigen Maßnahmen des Staates auszuschließen, die zwar möglich sind, es aber dennoch nicht verhindern können, daß die Grenzwerte der Nebenbedingungen zu irgendeinem späteren Zeitpunkt auch unter Ausnutzung der Toleranzbereiche über- bzw. unterschritten werden. Über die optimale Kombination der restlichen Eingriffsmöglichkeiten entscheidet dann die Zielfunktion, in diesem Fall also die Forderung nach Minimierung der Kosten.

Bei der Kostenminimierung besteht die Aufgabe zunächst darin, die j ä h r l i c h e n Kosten so klein wie möglich zu halten. Darüberhinaus besteht die Aufgabe, den Wert der über den gesamten Betrachtungszeitraum integrierten Kosten zu minimieren. Wegen der Unübersichtlichkeit währungspolitischer Einflüsse - z.B. unterschiedliche inflatorische Entwicklungen in verschiedenen miteinander in Verbindung stehenden Volkswirtschaften - erscheint diese Aufgabe jedoch nicht lösbar. Die Minimierung der jährlichen Kosten kann also nur bei Beschränkung auf e i n e Volkswirtschaft durch die Minimierung des integralen Wertes der Kosten ersetzt werden. Das Ergebnis der Optimierung ist die Angabe einer Folge staatlicher Maßnahmen nach Art und Zeitpunkt.

Es kann weiterhin untersucht werden, inwieweit ein solches Ergebnis von den Grenzwerten für die Nebenbedingungen und von den zugehörigen Toleranzen abhängig ist, die beide auch staatlicherseits beeinflußbar sind.

Wegen der Unsicherheiten verwendeter Daten und Voraussetzungen über den zeitlichen Verlauf energietechnischer Entwicklungen, wegen der Toleranzbereiche der Grenzwerte und möglicherweise sehr flacher Kostenminima ist es denkbar, daß mehrere zeitliche Folgen unterschiedlicher staatlicher Maßnahmen das Optimierungskriterium erfüllen. Die damit gegebene Vielfalt der Lösungen ist dann der Spielraum für politische Entscheidungen.

7.2 Untersuchungen über die Auswirkungen energietechnischer Innovationen

Unter den im Abschnitt 7.1.2 genannten Eingriffsmöglichkeiten des Staates in das Energiesystem ist die Förderung der Entwicklung von Neuerungen in der Energietechnik derjenige Teil, der sich überwiegend langfristig auswirkt. Um diese Auswirkungen überhaupt bestimmen zu können, muß die mit den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten angestrebte Neuerung möglichst weitgehend charakterisiert werden. Dazu gehören zunächst Angaben über den technischen und wirtschaftlichen Endzustand der Entwicklung. Diese Angaben müssen so detailliert sein, daß die Elemente der um diese Innovation erweiterten Matrix (siehe Abb. 3) mit Daten gefüllt werden können. Weiterhin sind Angaben über mögliche zeitliche Verläufe der Aufbauphase - z.B. neuer Energieumwandlungsanlagen - notwendig. Dabei müssen auch die Installationsgeschwindigkeiten nicht nur der Anlagen selbst sondern auch die der dazu nötigen Infrastruktur abhängig von ihren Einflußgrößen angegeben werden. Unsicherheiten solcher Angaben kann man mit der Abschätzung unterer und oberer Grenzen sowie dazwischen liegender wahrscheinlicher Werte gerecht werden.

Beispiele für die Vorauscharakterisierung beabsichtigter Innovationen liefern jeweils deren Proponenten. Solange es jedoch kein Gesamtmodell gibt, das die Art der Charakterisierung detailliert vorschreibt, ist die vollständige Erfassung der Auswirkungen nicht möglich. Der Versuch, die in [45] erfaßten Charakteristika der Nutzung der Kernspaltungsenergie in das im Abschnitt 5.3.4 beschriebene Gesamtmodell einzufügen, ist laut [29] vorgesehen. Das gleiche soll mit der in Arbeit befindlichen Zusammenstellung über die Nutzung der Sonnenenergie geschehen [46]. Arbeiten, die sich - wie z.B. [45] - nur auf eine Innovation oder eine Gruppe von Innovationen beziehen, gestatten keinerlei relevante Aussagen über die Auswirkungen, die die Einführung dieser Neuerungen auf das Gesamtsystem hat. Solche Arbeiten sind zwar als

Basis für die spätere Beurteilung unerlässlich, jedoch keinesfalls ausreichend. Dies gilt z.B. auch für die Nutzung der Fusionsenergie.

8. Schlußfolgerungen für die systemtechnischen Arbeiten zu Fusionsreaktoren

Aus den bisherigen Überlegungen resultieren zwei Aufgaben, die zunächst erfüllt werden müssen, wenn man die Frage beantworten will, ob der Fusionsreaktor ein lohnendes Ziel ist:

- Von dem mit Hilfe der Abb. 1 definierten Gesamtsystem ist ein dynamisches Modell anzufertigen, wie es im Abschnitt 5 beschrieben wurde.
- Die charakteristischen Merkmale der verschiedenen Arten denkbarer Fusionsreaktoren und -kraftwerke sind soweit zu bestimmen, wie dies nach dem jeweiligen Wissensstand möglich ist.

Nach Erfüllung dieser Aufgaben können die auf die Fusion bezogenen Daten in die Matrix (siehe Abb. 2) aufgenommen werden. Dann ist es möglich zu simulieren, wann und in welcher Weise sich die staatliche Maßnahme "Förderung der Entwicklung von Fusionsreaktoren" unter dem Gesichtspunkt der Optimierung des Gesamtsystems auswirkt.

Die zur erstgenannten Aufgabe bereits laufenden und noch durchzuführenden Arbeiten sind bereits im Abschnitt 5 erläutert worden. Der Fortgang dieser Arbeiten, an deren Steuerung das International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, maßgeblich beteiligt ist, sollte sorgfältig beobachtet werden. Dabei sollte auch darauf hingewirkt werden, daß die spätere Berücksichtigung der Fusion in diesem Gesamtmodell bereits frühzeitig vorgesehen wird. Ein intensiver Kontakt zwischen dem IPP und IIASA würde dies erleichtern und darüberhinaus auch die Beobachtung der Arbeiten an anderen Energie- und Gesamtmodellen ermöglichen.

Die zweite Aufgabe ist Angelegenheit des IPP. Die Integration des Fusionsreaktors in das Geldwertflußdiagramm setzt die Berechnung der spezifischen Anlage- und Brennstoffkosten voraus. Das Stoffflußdiagramm verlangt die Bestimmung der spezifischen Bau- und Betriebsstoffmengen. Die Berechnung der spezifischen Stoffmengen und Kosten wiederum ist nur möglich aufgrund einer detaillierten Analyse des gesamten Kraftwerkssystems bzw. der auf den verschiedenen Plasmaeinschlußkonzepten basierenden Systeme. Diese Analyse muß auf realen Betriebsbedingungen basieren, also auch Wartung und Revisionen sowie Störfälle und Reparaturen mit berücksichtigen, da diese die Kosten und Stoffflüsse wesentlich beeinflussen können.

Die nach Bearbeitung dieser beiden Aufgaben mögliche Überprüfung der verschiedenen Fusionskonzepte anhand des Gesamtmodells wird Aussagen über die Marktchancen dieser Konzepte liefern und wird erkennen lassen, wovon die Marktchancen im Einzelfall dominierend bestimmt werden. Daraus können dann auch Rückschlüsse für die Schwerpunkte der weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gezogen werden.

9. Literatur

- [1] Hudson, E.A. und D.W. Jorgenson: US Energy Policy Growth, 1975-2000. Proceedings of the IIASA Working Seminar on Energy Modelling, May 1974; Report CP-74-3; International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg/Wien
- [2] Tabellen des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin
- [3] Tabellen des Instituts für Wirtschaftsforschung (IFO), München

- [4] Herendeen, R.A.: An Energy Input-Output Matrix for the U.S., 1963: Users Guide. CAC Document No. 69, University of Illinois, March 4, 1973
- [5] Reardon, W.A.: Input-Output Analysis of U.S. Energy Consumption. Working Paper for a Seminar on Energy Modeling, Washington D.C. 1973. Edited by M.F. Searl, Resources for the Future, Inc.
- [6] Chapman, P.F. et al.: Energy Budgets; Parts 1, 2 and 4, Energy Policy, June and Sept. 1974, March 1975
- [7] Wright, D.J.: Energy Budgets; Part 3, Energy Policy, December 1974
- [8] Chapman, P.F.: Comments on energy costs derived from the input-output table; by private communication
- [9] Herendeen, R.A.: The Energy Cost of Goods and Services. Chapter II. H. in Electrical Energy and its Environmental Impact. ORNL-NSF-SP-40, March 1973
- [10] Herendeen, R.A. and Bullard, C.W.: Energy Impact of Consumption Decisions. Proc. of IEEE, Vol. 63, No. 3, March 1975
- [11] Arbeitskreis "Energiebilanzen" e.V.: Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1960-69, VWEW Frankfurt/M., 1972
- [12] Associated Universities, Inc.: Reference Energy Systems and Resource Data for Use in the Assessment of Energy Technologies. PB-221 422, AET-8, May 1972
- [13] Beck, P. and D. Goettling: Energie und Abwärme, Ursachen - Auswirkungen - Empfehlungen. Studie im Auftrag der Interparlamentarischen Arbeitsgemeinschaft. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1973
- [14] v. Kortzfleisch, G.: Sozialindikatoren zur Erfassung der Lebensqualität. Vortrag auf der Tagung "Wertpräferenzen in Technik und Gesellschaft" VDI-Düsseldorf, Februar 1975

- [15] Zaudi, I. et al.: Scarce Electric Power Allocation Project. Interim Report No. PR/72/4. University of Pennsylvania, National Center for Energy Management and Power
- [16] Strong, A.L.: Electric Power Rights, One Approach to Rationing. Report No. TR/73/4, see [15]
- [17] Florida Power proposes energy stamp program. Nuclear News, Vol. 18, No. 5, p. 54
- [18] Statistisches Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland. Herausgegeben vom Statistischen Bundesamt Wiesbaden
- [19] Stumpf, H.: Immissionsarme Wärmeversorgung. VDI-Berichte Nr. 222, 1974, S. 23-32
- [20] Lörch, H.: Integrierte Energieversorgung aus der Sicht der Städteplaner und Betreiber. VDI-Berichte Nr. 222, 1974, S. 33-40
- [21] Bonnenberg, H. und H. Drescher: Kernenergienutzung in der dicht besiedelten Bundesrepublik Deutschland; mögliche Probleme. Vortrag auf dem Arbeitsseminar AGF-ASA "Konsequenzen eines großtechnischen Einsatzes der Kernenergie", KfA Jülich, 1974
- [22] Bonnenberg, H. und H. Drescher: Orientierungsanalyse zur Problematik einer umfassenden Kernenergienutzung in einem hochverdichteten Land wie der Bundesrepublik Deutschland. Studie im Auftrag der AGF-ASA, geplant.
- [23] Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfurt/M.
- [24] De Bauw, R.: Private Mitteilung im Zusammenhang mit dem Vortrag "Energy Demand - The European Situation", International School of Fusion Reactor Technology, Erice, Sept. 1972
- [25] Charpentier, J.P.: A Review of Energy Models: No 1 - May 1974. IIASA-Research Report RR-74-10, July 1974

- [26] Charpentier, J.P.: Overview on Models and Methods used in Energy Modelling. Vortrag auf dem Arbeitsseminar "Energiemodelle für die Bundesrepublik Deutschland" Jülich 1975, Jül-Conf-15; IIASA-Research Memorandum RM-75-8
- [27] Hoffman, K.C.: A Unified Framework for Energy System Planning. Working Paper for a Seminar on Energy Modeling, Washington D.C., 1973. Edited by M.F. Searl, Resources for the Future, Inc.
- [28] Zusammenarbeit zwischen der Universität Tübingen, IIASA Laxenburg und GfK Karlsruhe
- [29] Häfele, W. (IIASA): Private Mitteilungen über Gespräche und Briefwechsel mit D. Jorgensen
- [30] Conrad, K.: Energieprojektionen für die Bundesrepublik Deutschland anhand eines ökonomischen Makro- und Input-Output-Modells. Vortrag auf dem Arbeitsseminar "Energiemodelle für die Bundesrepublik Deutschland", Jül-Conf-15, April 1975
- [31] Hudson, E.: Economic Analysis of Alternative Energy Growth Patterns, 1975-2000. Proceedings of the IIASA Working Seminar on Energy Modelling, May 1974. Report CP-74-3. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg/Wien
- [32] Hoffman, K.C.: A Systems Approach to Energy Resource Planning. Vortrag auf dem Arbeitsseminar "Energiemodelle für die Bundesrepublik Deutschland", Jül-Conf-15, April 1975
- [33] Hoffman, K.C. und Cherniavsky, E.: Interfuel Substitution and Technological Change. Proceedings of the IIASA Working Seminar on Energy Modelling, May 1974. Report CP-74-3. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg/Wien

- [34] Goldberg, M.: An Energy Model Data Base. Brookhaven National Laboratory, BNL-ESAG-5, 1973
- [35] Thoss, R.: A Generalized Input-Output Model for Residuals Management. Sixth International Conference on Input-Output Techniques, Vienna, 1974
- [36] Döllekes, H.P.: Ein multisektorales Energie- und Umweltplanungsmodell. Vortrag auf dem Arbeitseminar "Energiesmodelle für die Bundesrepublik Deutschland", Jül-Conf-15, April 1975
- [37] Baughman, M.L. und Hnyilicza, E.: Energy Systems: Modelling and Policy Planning. Proc. of the IEEE, Vol. 63, No. 3, March 1975
- [38] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), GMB1 (1974), Nr. 24, S. 425
- [39] Erste Strahlenschutzverordnung vom 24.6.1960, Bundesgesetzblatt I, S. 430; Neufassung vom 22.10.1965, Bundesgesetzblatt I, S. 1653
- [40] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP Publ. 2), Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation (1959)
- [41] Jacobi, W.: Beziehungen zwischen der Strahlendosis und dem somatischen Strahlenrisiko. atw, Juni 1974
- [42] International Symposium on the combined effects on the environment of radioactive, chemical, and thermal releases from the nuclear industry. Stockholm, Juni 1975, IAEA
- [43] Avenhaus, R. und Häfele, W.: Systems Aspects of Environmental Accountability. IIASA-Report RR-73-6

- [44] Keeney, R.L.: Thoughts on the Establishment of Standards. IIASA-Report WP-74-72
- [45] Häfele, W. und Manne, A.: Strategies for a Transition from Fossil to Nuclear Fuels. IIASA-Report RR-74-7
- [46] Weyss, N. (IIASA): private Mitteilung

Tabelle 1 Disaggregation der Energieformen

1. Kernenergie
 - 1.1 Kernspaltung
 - 1.1.1 Hochtemperatur-Reaktor
 - 1.1.2 Schneller Brutreaktor
 - 1.1.3 Leichtwasser-Reaktor
 - 1.1.4 Schwerwasser-Reaktor
 - 1.2 Kernfusion
 - 1.2.1 D-T-Reaktor
 - 1.2.2 D-D-Reaktor
 - 1.3 Hybrid-Reaktoren
2. Sonnenenergie
 - 2.1 Direkte Nutzung
 - 2.1.1 terrestrische Umwandlung
 - 2.1.2 extraterrestrische Umwandlung
 - 2.2 Indirekte Nutzung
 - 2.2.1 Wasserkraft
 - 2.2.2 Wind
 - 2.2.3 Meereswärme
 - 2.2.4 organische Brennstoffe
3. Tidenenergie
4. Geothermische Energie
5. Chem. Bindungsenergie (natürl.)
 - 5.1 Naturgas
 - 5.2 Mineralöl
 - 5.2.1 M. aus direkter Förderung
 - 5.2.2 M. aus Teersand
 - 5.2.3 M. aus Ölschiefer
 - 5.3 Mineralölprodukte
 - 5.3.1 Schweres Heizöl
 - 5.3.2 Leichtes Heizöl/Dieselöl
 - 5.3.3 Benzine
 - 5.3.4 Sonstige
 - 5.4 Kohle
 - 5.4.1 Steinkohle
 - 5.4.2 Koks
 - 5.4.3 Braunkohle
 - 5.4.4 Sonstige und Kohleprodukte
6. Chem. Bindungsenergie (künstl.)
 - 6.1 Synth. Kohlenwasserstoffe (flüssig)
 - 6.1.1 Benzin
 - 6.1.2 Methanol
 - 6.2 Synth. Kohlenwasserstoffe (gasförmig)
 - 6.3 Wasserstoff
 - 6.4 Latentwärmeträger
7. Elektrische Energie
 - 7.1 Wechselstrom
 - 7.2 Gleichstrom
8. Therm. Energie (Hochtemperatur)
 - 8.1 H₂O-Dampf
 - 8.2 Gase
 - 8.2.1 Verbrennungsgas
 - 8.2.2 Gase als Wärmeträger
 - 8.3 Metall-Dämpfe
 - 8.4 Organische Stoffe
9. Therm. Energie (Niedertemperatur)
 - 9.1 Fernwärme (Wasser; Dampf)
 - 9.2 Warmwasser
 - 9.3 Warmluft
10. Mech. Energie
 - 10.1 Antrieb stationärer Anlagen
 - 10.1.1 in der Industrie
 - 10.1.2 im Haushalt
 - 10.2 Antrieb von Transportmitteln
11. Licht
12. Energie in Gütern
 - 12.1 Konsumgüter
 - 12.2 Investitionsgüter
 - 12.2.1 energietechn. I.-Güter
 - 12.2.2 nicht-energietechn. I.-Güter

Tabelle 2 Disaggregation der Umweltveränderungen

1. Inanspruchnahme von Grundfläche und Raum für Anlagen und umgebende Schutzbereiche

2. Emissionen in die Atmo-, Hydro- und Lithosphäre (Immissionen)
 - 2.1 Stoffe (fest, flüssig, gasförmig)
 - 2.1.1 toxische Stoffe
 - 2.1.2 radioaktive Stoffe
 - 2.1.3 riechende Stoffe

 - 2.2 Energie
 - 2.2.1 Wärme
 - 2.2.3 Schall

Tabelle 3 Einteilung der Modelle (nach [25])

B e r e i c h		national	international
Energie-System	ein Brennstoff	A 32 ^{*)}	B 4 ^{*)}
	verschiedene Arten von Brennstoffen	C 16 ^{*)}	D 1 ^{*)}
Verbindung zwischen Energie-und Gesamt- wirtschaft		E 12 ^{*)}	F 4 ^{*)}

*) Anzahl der Modelle in dieser Kategorie

Tabelle 4 Matrix-Kategorien des Hoffman-Modells

1. Versorgung
 - 1.1 Wasserkraft
 - 1.2 Geothermische Energie
 - 1.3 Kohlekraftwerke
 - 1.4 Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktor
 - 1.5 Kernkraftwerke mit Schnellem Brutreaktor
 - 1.6 Gasturbinenkraftwerke
 - 1.7 Pumpspeicher
 - 1.8 Mineralölprodukte
 - 1.9 Erdgas
 - 1.10 Synthetische Brennstoffe
 - 1.11 Kohle und Kohleprodukte
 - 1.12 Sonnenenergie
 - 1.13 Mehrzweck-Anlagen

2. Bedarf
 - 2.1 Raumheizung
 - 2.2 Klimatisierung
 - 2.3 Mittellast
 - 2.4 Grundlast elektr. Energie
 - 2.5 Spitzenlast
 - 2.6 Wasserentsalzung
 - 2.7 Pumpspeicher und synthetische Brennstoffe
 - 2.8 Wasserheizung
 - 2.9 verschiedene therm. Nutzung
 - 2.10 Luftverkehr
 - 2.11 öffentlicher Verkehr (a.d. Erde)
 - 2.12 privater Verkehr (a.d. Erde)
 - 2.13 Eisen- u. Stahlproduktion
 - 2.14 Zementproduktion
 - 2.15 Mineralölprodukte und synth. Stoffe

Tabelle 5 Schema der Lieferverflechtung (aus [30])

an von		Input an:																				
		1	2	...	13	14	15	16	17	18	19	20										
Input von:	1	Interindustrielle Verflechtung													Volkswirtschaft- liche Endnach- frage							Gesamter Output
	2																					
	3																					
	4																					
	5																					
	.																					
	.																					
	.																					
	13																					
	14																					
	15																					
	16																					
	17																					
	18																					

Sektoren:

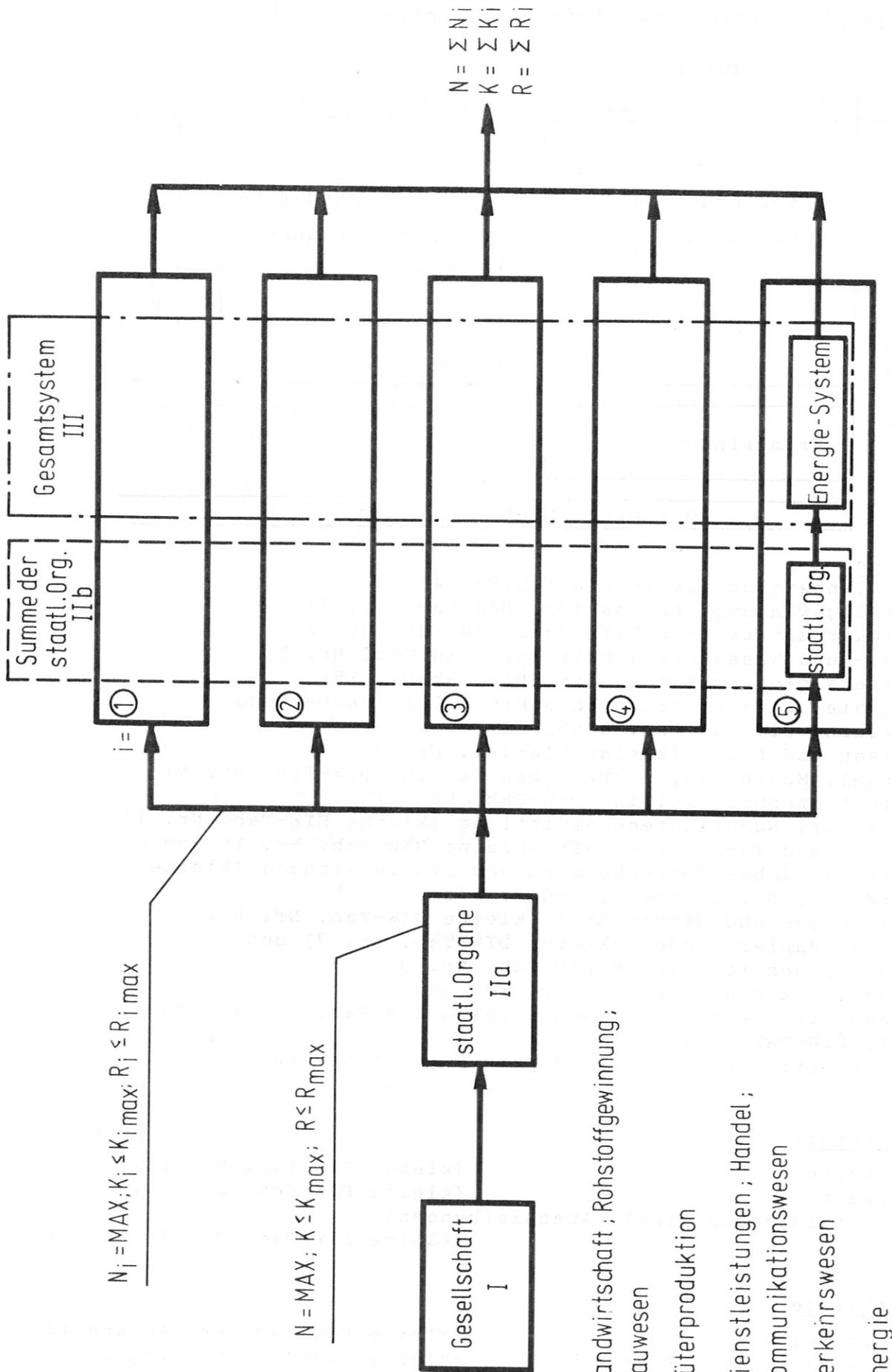
1. Kohlenbergbau (große DIW-Tab.Nr. 4)
2. Erdölgewinnung, Erdgas (gr. DIW-Tab. Nr. 7)
3. Elektrizitätswirtschaft (gr. DIW-Tab. Nr. 2)
4. Gas- und Wasserwirtschaft (gr. DIW-Tab. Nr. 3)
5. Mineralölverarbeitung (gr. DIW-Tab.Nr. 15)
6. Chemie, Steine, Erden ohne Mineralölverarbeitung
(kleine DIW-Tab. Nr. 3 ohne 5) oben)
7. Eisen und Stahl (kleine DIW-Tab. Nr. 4)
8. Stahl, Maschinen, Fahrzeugbau (kleine DIW-Tab. Nr. 5)
9. Elektrotechnik (kleine DIW-Tab. Nr. 6)
10. Verkehr, Nachrichtenübermittlung (kleine DIW-Tab. Nr. 11)
11. Land- und Forstwirtschaft (kleine DIW-Tab. Nr. 1) und
Bergbau (ohne Kohlenbergbau und Erdölgewinnung (kleine
DIW-Tab. Nr. 2 ohne 1) und 2) oben)
12. Nahrungs- und Genußmittel (kleine DIW-Tab. Nr. 8)
13. Holz, Papier, Leder (kleine DIW-Tab. Nr. 7) und
Bauwirtschaft (kleine DIW-Tab. Nr. 9)
14. Handel (kleine DIW-Tab. Nr. 10) und
sonstige Dienstleistungen (kleine DIW-Tab. Nr. 12 und
kl. DIW-Tab. Nr. 14)
inkl. priv. Haushalte und priv. Org. ohne Erw.

Primärinputs

- | | |
|---|---------------------------------|
| 15. Importe | (kleine DIW-Tab. Nr. 15) |
| 16. Arbeit | (kleine DIW-Tab. Nr. 20) |
| 17. Kapitaldienste (inkl. Abschreibungen) | (kleine DIW-Tab. Nr. 16 und 21) |

Endnachfrage

- | | |
|-------------------------------|--|
| 15. Privater Verbrauch | (kleine DIW-Tab. Nr. 16 und 17) |
| 16. Private Bruttoinvestition | (kleine DIW-Tab. Nr. 18, 20,
21 und 22) |
| 17. Investitionen des Staates | (kleine DIW-Tab. Nr. 19) |
| 18. Konsum des Staates | (kleine DIW-Tab. Nr. 15) |
| 19. Exporte | (kleine DIW-Tab. Nr. 23) |



- ① Landwirtschaft; Rohstoffgewinnung;
Bauwesen
- ② Güterproduktion
- ③ Dienstleistungen; Handel;
Kommunikationswesen
- ④ Verkehrswesen
- ⑤ Energie

ABB. 1 BLOCKDIAGRAMM ZUR BESCHREIBUNG DER VERBINDUNG ZWISCHEN DEM ENERGIE-SYSTEM UND DER GESELLSCHAFT. (IM SINNE DER ÜBERSICHTLICHKEIT WURDEN DIE RÜCKFÜHRUNGEN NICHT DARGESTELLT).

direkte Umwandlung bzw. Verwendung von \ / in für		Primär - E.				Zwischenform der E.			Nutzenergie für den Verbraucher				
		1 Kern - E.	2 Sonnen - E.	3 Tiden - E.	4 Geoth - E.	5 natürl. -chem. Bindgs. - E.		7 elektr. E.	8 HT therm. E.	9 NT therm. E.	direkt		12 E. in Gütern
						6 künstl.	10 mech. E.				11 Licht		
i =	j =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Kern - E.								•				
2	Sonnen - E.							•	•	•			
3	Tiden - E.							•					
4	Geoth. - E.							•		•			
5	natürl. -chem. Bindgs. - E.						R ^{x)} •		•	•			R ^{x)} •
6	künstl.								•	•	•		R ^{x)} •
7	elektr. E.									•	•	•	•
8	HT therm. E.						•	•		•	•		•
9	NT therm. E.												•
10	mech. E.												•
11	Licht												•
12	E. in Gütern ^{xx)}	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

x) Index 'R': auch Verwendung als Rohstoff

xx) Investitionsgüter für die Energietechnik (j=1-11) und für die Produktion von Konsumgütern (j=12)

ABB. 2 ZUORDNUNG VON PRIMÄRENERGIE, ZWISCHEN-ENERGIEFORMEN UND NUTZENERGIE IN MATRIXDARSTELLUNG

direkte Umwandlung bzw. Verwendung von \ / in für		Primär-E.				Zwischenform der E.			Nutzenergie für den Verbraucher			
		1 Kern-E.	2 Sonnen-E.	3 Tiden-E.	4 Geoth.-E.	5 natürl. -chem.Bindgs.-E.	6 künstl.	7 elektr. E.	8 HT therm. E.	9 NT therm. E.	10 mech. E.	11 Licht
1	Kern-E.							x _{1,8}				
2	Sonnen-E.						x _{2,7}	x _{2,8}	x _{2,9}			
3	Tiden-E.						x _{3,7}					
4	Geoth.-E.						x _{4,7}		x _{4,9}			
5	natürl. -chem.Bindgs.-E.					x _{5,6}		x _{5,8}	x _{5,9}			x _{5,12}
6	künstl.							x _{6,8}	x _{6,9}	x _{6,10}		x _{6,12}
7	elektr. E.								x _{7,9}	x _{7,10}	x _{7,11}	x _{7,12}
8	HT therm. E.					x _{8,6}	x _{8,7}		x _{8,9}	x _{8,10}		x _{8,12}
9	NT therm. E.											x _{9,12}
10	mech. E.											x _{10,12}
11	Licht											x _{11,12}
12	E. in Gütern	x _{12,1}	x _{12,3}	x _{12,4}	x _{12,5}	x _{12,6}	x _{12,7}	x _{12,8}	x _{12,9}	x _{12,10}	x _{12,11}	x _{12,12}

ABB. 3 ZUORDNUNG VON PRIMÄRENERGIE, ZWISCHENENERGIEFORMEN UND NUTZENERGIE IN MATRIXDARSTELLUNG

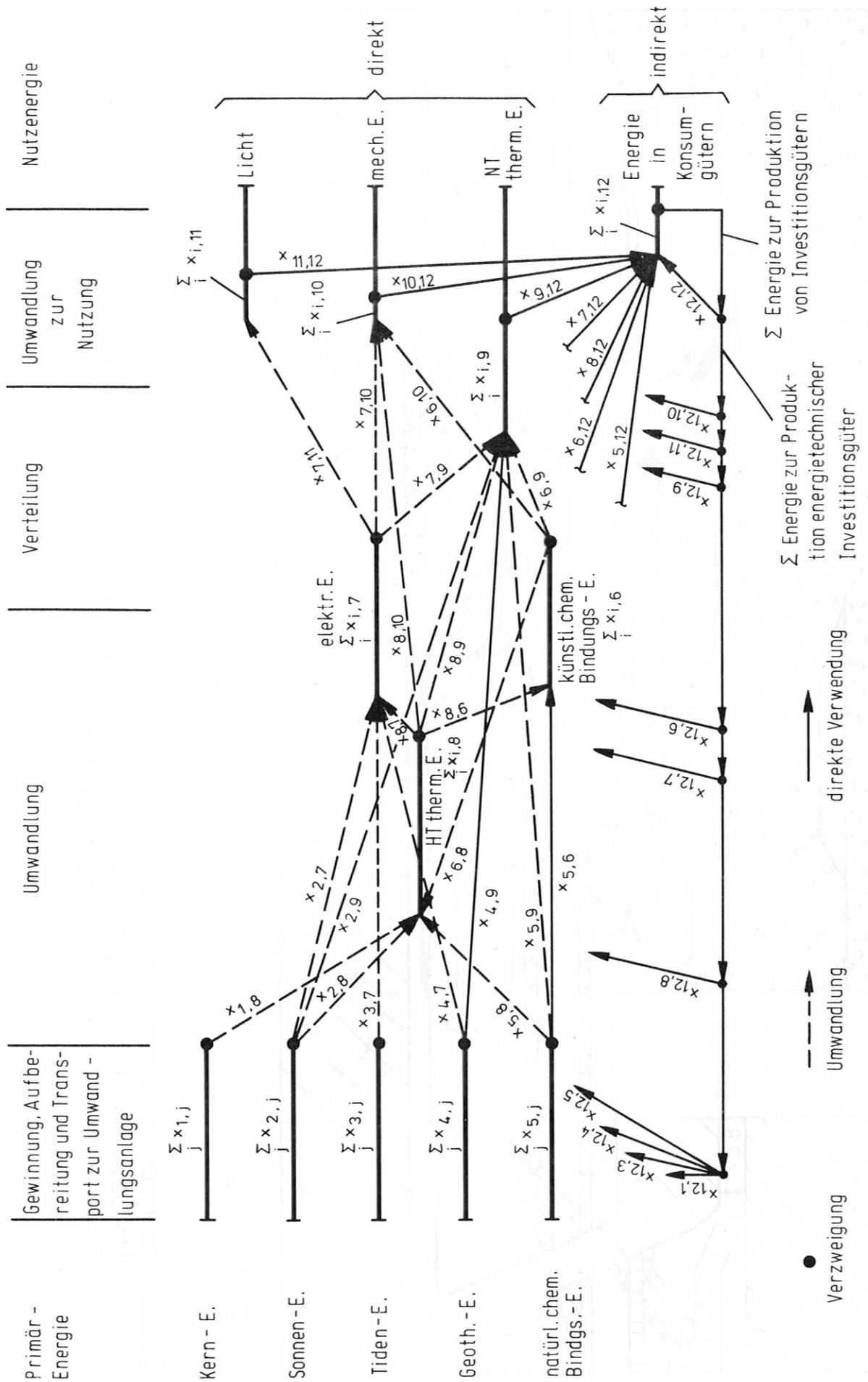
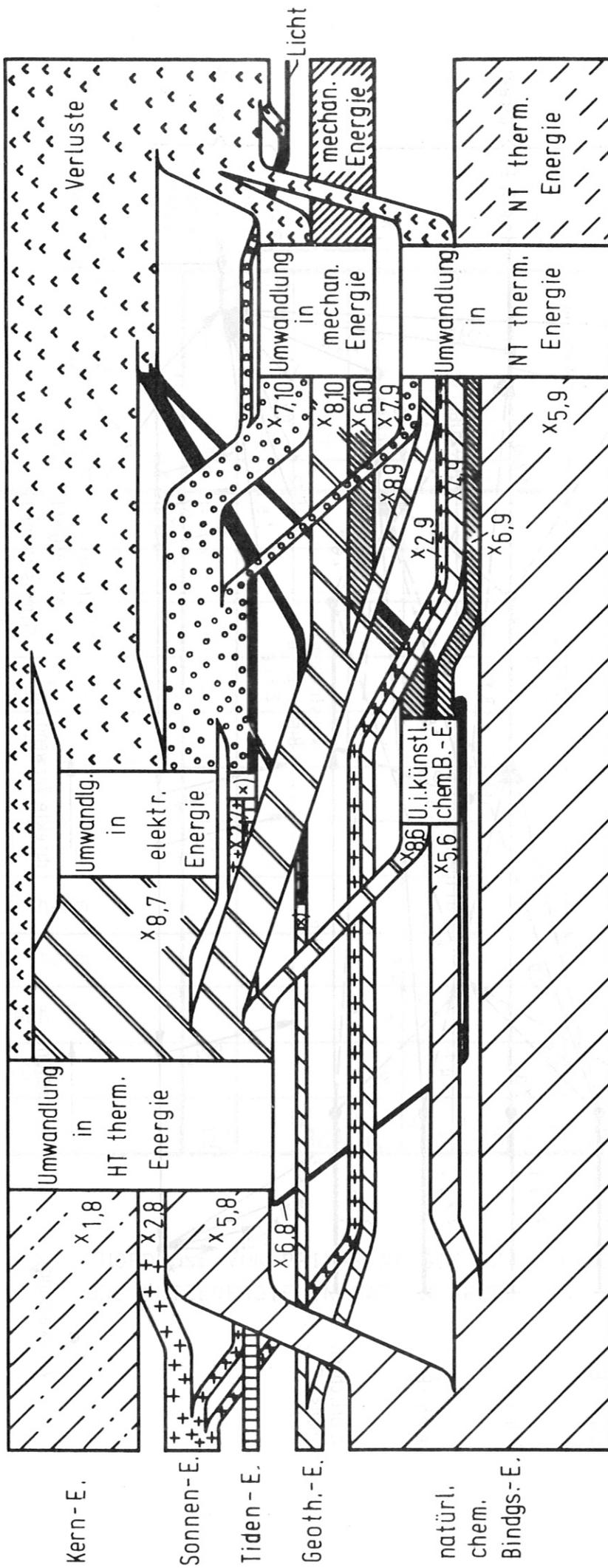
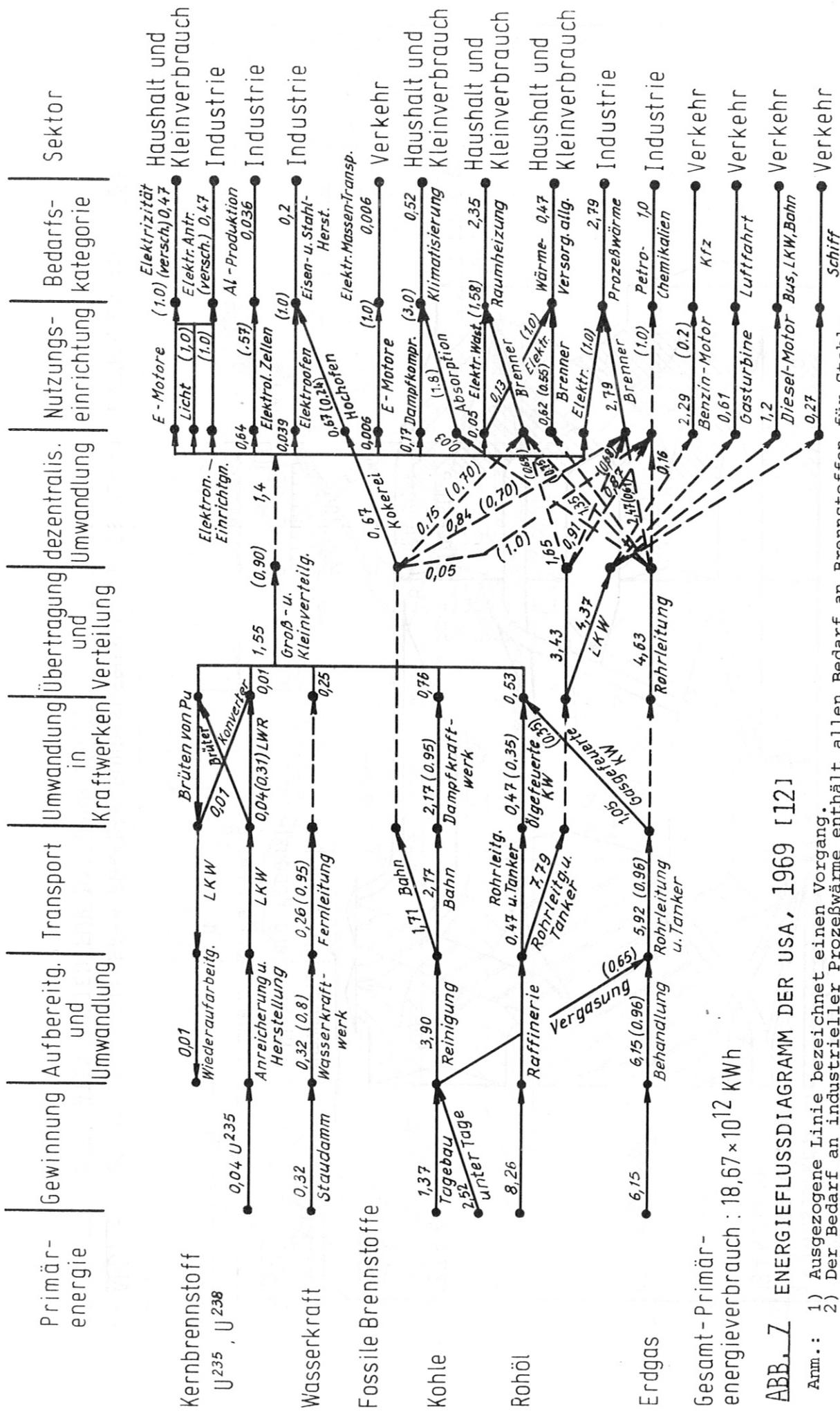


ABB. 4 ZUORDNUNG VON PRIMÄRENERGIE, ZWISCHENERGIEFORMEN UND NUTZENERGIEFORMEN IM NETZDIAGRAMM



☒ Umwandlung in elektrische Energie

ABB. 5 ENERGIEFLUSSDIAGRAMM (ZU ABB. 3 UND 4)
 (IN DEN UMWANDLUNGSVERLUSTEN SIND DIE VERLUSTE DER NACHFOLGENDEN VERTEILUNG MIT ENHALTEN)
 (HT = HOCHTEMPERATUR; NT = NIEDERTEMPORATUR)



Gesamt-Primärenergieverbrauch: $18,67 \times 10^{12}$ kWh

ABB. 7 ENERGIEFLUSSDIAGRAMM DER USA, 1969 [12]

- Anm.: 1) Ausgezogene Linie bezeichnet einen Vorgang.
 2) Der Bedarf an industrieller Prozesswärme enthält allen Bedarf an Brennstoffen für Stahl- und Al-Produktion außer an elektrischer Energie und Kohle sowie allen anderen industriellen Bedarf.
 3) Der jeweilige Energiefluß ist über der Linie in 10^{12} kWh angegeben. Wirkungsgrade sind in Klammern hinzugefügt.
 4) Öl- und gasgefeuerte Kraftwerke sind Dampf- und Gasturbinenkraftwerke.

Beschreibung des Hoffman-Modells (entnommen aus [25])

The Model	Kenneth Hoffman, 1972 ⁽⁶¹⁾ , Brookhaven National Laboratory, Upton, L.I., N.Y. Planning Framework for Energy System Planning.	
Subject and Goal	Optimal technical structure of the US energy system. The model reflects a wide range of energy technologies and interfuel substitutability. It traces paths from primary consumption to final demand for each type of fuel.	
System Described	This model is concerned with the substitution of different fuels at the level of disaggregated demand and supply. In addition, it estimates the volume of each type of pollutant produced by the energy system.	
Area	Time	Static model for a particular point in time (has been applied to the years 1985 and 2000).
	Space	USA as a whole.
Modelling Techniques	Optimization model using linear programming. The model provides a feasible path between n=13 exogenous supply categories and m=15 exogenous demand categories. The objective function is the minimized solution of the present cost of the possible paths. Three constraints must be satisfied: the level of each kind of demand, the possibility of each kind of supply system, and the levels of the different pollutions. An expanded model is under development with 27 supply categories and 22 demand categories.	
Input Data Physical	<p>n=13 supply categories are considered as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 8 kinds of central stations that produce electricity as an intermediate energy form: hydropower, geothermal, coal-steam electric, LWR electric, LMFBR electric, gas turbine electric, pumped storage electric and solar energy. - 4 general purpose fuels that are directly delivered to consumers: oil products, natural gas, synthetic fuel (hydrogen) and coal gas and coal. - 1 decentralized electric supply system known as: total energy (up to 5 MW output) (diesel generators or gas turbine or fuel cells.) <p>For each supply category, the model needs the knowledge of:</p> <ul style="list-style-type: none"> - the supply constraint given in units of 10¹⁵ Btu. - the amount of energy that can be delivered by a particular supply category, limited either by the energy conversion capacity or by the quantity of available energy resources. <p>m=15 demand categories are considered as follows:</p> <p>The demand is divided into 2 sub-categories:</p> <ul style="list-style-type: none"> - exogenous demand, i.e. different categories of energy demand: space heat, air conditioning, electricity at 3 different load factors, water desalination, pumped storage, production of synthetic fuels, water heating, miscellaneous thermal heating, air transport, ground transport (public and private), iron production, cement production, and petrochem and synthetic materials. - endogenous demand: for the electricity mentioned above the model takes into account the load duration curve of the system. For certain demand categories, the different plants can be mixed in order to optimize the global load factor curve. The load structures on a seasonal and weekly basis are taken into account. 	
Ecological	The model incorporates air pollutants and other wastes generated by energy conversion activities that are proportional to the amount of energy delivered: CO ₂ , CO, SO ₂ , NO, particulates, hydrocarbon, radioactive wastes and thermal wastes. Other pollutants and land use will be incorporated in the expanded model.	
Economic	The coefficients of cost in the objective function reflect the necessary cost of the facilities used in the energy supply system as well as fuel and other operating costs. The necessary cost of capital for the electric supply category is a function of the plant load factor which is also a function of each specific demand category.	
Output Data Physical	The model gives for a specified level of each demand the optimal utilization of the different available supply systems.	
Economic	The model gives the total cost of the energy system but the resulting optimal path is greatly dependent on the different input costs.	
Ecological	The model gives the volume of the different polluting emissions.	
Observations	<ul style="list-style-type: none"> - This model is static; it can be used only for one year. For that year it is necessary to know the demand and the supply categories. The level of the different kinds of demands can be obtained by using an input-output model. - The price electricity of demand is not taken into account in the current model but is being added to the expanded model. - Dynamization of the model is being studied. 	