

## Energiemodelle für die Bundesrepublik Deutschland

Von Dr.-Ing. A. Voss, Jülich<sup>1)</sup>

### 1. Einleitung

Die Entwicklung und Anwendung von Energiemodellen als Planungs- und Entscheidungshilfe hat in der jüngsten Vergangenheit in allen Bereichen der Energiewirtschaft und Energiepolitik an Bedeutung gewonnen. Neben der Entwicklung sektoraler und betrieblicher Modelle, wie z.B. zur Ausbauplanung von Kraftwerkssystemen sind aber auch Modelle entwickelt worden, die das gesamte Energiesystem abbilden.

Ziel dieser Modelle ist es, die Entwicklungsmöglichkeiten der Energieversorgung unter ganzheitlichen Gesichtspunkten zu analysieren, wobei insbesondere die Einbettung des Energiesystems in wirtschaftliche und ökologische Randbedingungen erfaßt werden soll.

Im folgenden werden nach einer Analyse der Energieproblematik und der sich daraus ergebenden Anforderungen an die Energieplanungsmethoden, die für die Bundesrepublik Deutschland entwickelten Energiemodelle kurz erläutert. Dabei wird insbesondere auf das von der Programmgruppe "Systemforschung und Technologische Entwicklung" der Kernforschungsanlage Jülich entwickelte Energiemodellsystem eingegangen, wobei einige Modellergebnisse exemplarisch erläutert werden. Abschließend wird dann noch zum Problem der Einbeziehung und Umsetzung von Modelluntersuchungen im Entscheidungsprozeß Stellung genommen.

### 2. Energieprobleme und Energiemodelle

Die in jüngster Zeit weltweit verstärkten Aktivitäten zur Entwicklung von umfassenden Energiemodellen /1,2,3/ als Entscheidungshilfe für die Energieplanung, haben ihre Ursachen sicher nicht in der sogenannten Ölkrise des Jahres 1973, obwohl ein Außenstehender diesen Eindruck haben könnte, sondern sie sind vielmehr Ausdruck der zunehmenden Erkenntnis, daß die Lösung immer komplexer gewordener Energieprobleme adäquater Planungs- und Entscheidungsinstrumentarien bedarf.

In der Vergangenheit waren der stetig wachsende Energiebedarf und die kostengünstige Energiebereitstellung die treibenden Kräfte für die Entwicklung neuer Energietechnologien und die Evolution der Energiewirtschaft. Andere Gesichtspunkte waren von untergeordneter Bedeutung. Übertragen auf die Planungsentscheidungen hieß das, daß sie auf einfachen Modellen mit wenigen Parametern und überschaubaren Zusammenhängen aufbauen konnten. Die vielen Planungen der Vergangenheit zugrunde liegende Modellvorstellung einer Verdopplung des Elek-

trizitätsbedarfs alle 10 Jahre ist hierfür wohl das bekannteste Beispiel. Daß diese einfachen Modellanalysen dennoch brauchbare Entscheidungshilfen geben konnten, lag begründet in dem Vorhandensein ausreichender Ressourcen und den quantitativ geringen Nebeneffekten der Energienutzung, die somit die technologische Entwicklung kaum beeinflussten. Das mit der wirtschaftlichen Entwicklung einhergehende exponentielle Wachstum des Energieverbrauchs hat die Situation heute völlig verändert. Einerseits ist die moderne Industriegesellschaft, ihr Funktionieren und ihr Fortbestand immer abhängiger von einer reibungslosen und ausreichenden Energieversorgung geworden, andererseits haben damit nahezu zwangsläufig die unerwünschten Nebeneffekte der Energienutzung, genannt seien hier nur die Umweltbelastung und die Abhängigkeit unserer Energieversorgung von importierten Energieträgern ein Niveau erreicht, das nicht ohne Rückwirkung auf die Gestaltung unserer zukünftigen Energieversorgung bleiben kann. Dieser veränderten Situation müssen natürlich auch die für die Planung der Energieversorgung angewendeten Verfahren und Methoden angepaßt werden. Dies heißt, da die Sicherung unserer zukünftigen Energieversorgung nicht länger als ein isoliertes technisch-ökonomisches Problem angesehen werden kann, daß auch die Analyse- und Planungsmethoden diese neuen Sachzwänge und Randbedingungen mit einfassen müssen. "Ganzheitliche Problembetrachtung" und "Integrierte Energiesysteme" sind zwei der Schlüsselbegriffe, die diese neuen Anforderungen charakterisieren.

Anders ausgedrückt heißt dies, daß die Analyse- und Planungsmethoden die Konsequenzen von alternativen energiepolitischen Entscheidungen möglichst vollständig beschreiben sollen und zwar bevor die Entscheidung selbst getroffen wird. Dazu muß zunächst das komplexe Zusammenwirken und die wechselseitige Beeinflussung der Elemente des Energiesystems überschaubar gemacht und quantifiziert werden.

Einige der dabei im Rahmen energiepolitischer oder gesamtenergiewirtschaftlicher Analysen und Planungen zu berücksichtigenden Bereiche, im englischen mit "Impact areas" bezeichnet, sind in Tafel 1 aufgelistet. Neben der Wirtschaft und der Umwelt sind dies die Bereiche Ressourcen, Mensch und Gesellschaft und Politik. So ist es z.B. erforderlich, nicht nur die Kosten der Energiebereitstellung bei verschiedenen Energieversorgungssystemen zu analysieren, sondern eine ebenso große Bedeutung kommt z.B. der Ermittlung des Einflusses auf die Wirtschaftsstruktur oder der Frage des Kapitalbedarfs für den Ausbau der Energieversorgung zu. Letztere wird ja gerade im Zusammenhang mit dem Ausbau der Kernenergie intensiv diskutiert.

<sup>1)</sup> zur Zeit: Wien

TAFEL 1: EINFLUSSBEREICHE VON ENERGIESYSTEMEN

	KOSTEN
	KAPITALBEDARF
- WIRTSCHAFT	ARBEITSKRÄFTE
	WIRTSCHAFTSSTRUKTUR
	LUFTVERSCHMUTZUNG
- UMWELT	WASSERVERSCHMUTZUNG
	ABFALL
	KLIMA
	WASSER
- RESSOURCEN	LAND
	ROHSTOFFE
	GESUNDHEIT
- MENSCH U. GESELLSCHAFT	RISIKO
	LEBENSSTANDARD
	F+E-AUFWAND
- POLITIK	SUBVENTIONEN UND ANDERE MASSNAHMEN
	VERSORGUNGSSICHERHEIT

Kann man den Bereich Energie und Wirtschaft als den traditionellen Untersuchungsgegenstand im Rahmen energiepolitischer Entscheidungen bezeichnen, so wird der Versuch auch die anderen Bereiche in die Analysen mit einzubeziehen, erst seit kurzem unternommen und er steht zum Teil, auch methodisch, noch in den Anfängen. Hingewiesen sei in diesem Zusammenhang noch auf die Fragen des Risikos und der Risikoakzeptierung neuer Technologien, die obwohl von genereller Natur, in der Öffentlichkeit vornehmlich mit der Nutzung der Kernenergie verknüpft wird.

Wie groß die Wechselwirkung des Energiesystems mit einigen dieser Bereiche ist, zeigen die in Tafel 2 aufgeführten Zahlen. Sie machen deutlich, daß die oben angedeuteten Problemstellungen keineswegs akademischer Natur sind, sondern eine große energiepolitische Relevanz haben. So beträgt z.B. der Anteil der Energiewirtschaft und Bergbau am Beitrag der gesamten Industrie zum Bruttoinlandsprodukt 14% (1972) während ihr Anteil an den Investitionen der Industrie mit 30% (1972) doppelt so hoch ist.

Besonders groß ist der Einfluß der Energienutzung auf die Umweltbelastung, die bei einigen wichtigen Schadstoffen nahezu ausschließlich durch die Art und Menge der Energienutzung bestimmt wird. Auch bei den Forschungsmitteln, deren Ausgabenstruktur ja zumindest implizit eine Prioritätenskala der Einschätzung unserer Probleme widerspiegelt, sind die Ausgaben für die Energieforschung mit 50% der Gesamtausgaben wesentlich größer als für jedes andere Gebiet.

Das bisher Gesagte sollte die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Einbettung und Integration des Energiesystems in seine Umgebung bei der Planung zukünftiger Energieversorgungssysteme deutlich machen. Die Situation der Ent-

TAFEL 2: ZAHLEN ZUR CHARAKTERISIERUNG DER BEDEUTUNG DES ENERGIESYSTEMS IN VERSCHIEDENEN BEREICHEN

<u>WIRTSCHAFT</u>	
BRUTTOINLANDSPRODUKT (1972)	
INDUSTRIE, GESAMT	321,1 MRD. DM
ENERGIEWIRTSCHAFT	44,1 MRD. DM
INVESTITIONEN (1972)	
INDUSTRIE, GESAMT	40,4 MRD. DM
ENERGIEWIRTSCHAFT	14,3 MRD. DM
<u>UMWELT</u>	
ANTEIL DER ENERGIENUTZUNG AN	
CO -EMISSIONEN	83%
SO <sub>2</sub> -EMISSIONEN	72%
NO <sub>x</sub> -EMISSIONEN	98%
<u>FORSCHUNGSMITTEL</u>	
ETAT BMFT	
ANTEIL ENERGIEFORSCHUNG	50%

scheidungsfindung, insbesondere auf der überbetrieblichen Ebene des Energiesystems, ist daneben auch noch durch den Aspekt der "Langfristigkeit" der Problemlösungen gekennzeichnet. Hiermit sind z.B. die für die Entwicklung und Einführung neuer Energietechnologien notwendigen Zeiträume von mehreren Jahrzehnten gemeint, die den für die Entscheidungsfindung notwendigen Betrachtungshorizont weit in die Zukunft hinausschieben. Denn ebenso gefährlich wie die Steuerung eines großen Öltankers, der einen notwendigen Bremsweg von mehreren Kilometern hat, mit einer Sicht von nur fünfzig Metern ist es, bei der Planung der zukünftigen Energieversorgung die für Veränderungen notwendigen Vorlaufzeiten und Zeitkonstanten zu vernachlässigen. Diese Notwendigkeit der langfristigen Betrachtung hat dabei nichts mit einer Langfristprognose oder Entscheidungen in ferner Zukunft zu tun, sondern sie dient viel mehr der Ermittlung der heute zu treffenden Entscheidungen unter Berücksichtigung der für ihr Wirksamwerden notwendigen Zeiträume.

"Langfristigkeit" und "Komplexität" der anstehenden Energieprobleme waren letztlich die Motivationen für die Arbeiten zur Entwicklung umfassender EDV-gestützter Energiemodelle, die vor einigen Jahren begannen und auch heute noch keineswegs abgeschlossen sind, sondern eher noch am Anfang stehen.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung und Anwendung derartiger komplexer Modelle, sowie in der Diskussion ihrer Ergebnisse, ihrer Möglichkeiten und Grenzen sollte stets beachtet werden, daß ein Modell notwendigerweise immer nur



ein stark vereinfachtes Abbild des realen Systems ist, dessen Vereinfachungen, oder anders ausgedrückt, dessen Elemente und Struktur im wesentlichen von der Zielsetzung des Modells, d.h. den Frage- und Problemstellungen die mit dem Modell analysiert werden sollen, bestimmt werden. Ein Supermodell, das Antworten auf alle Fragen gibt, wird es deshalb nicht geben. Ebenso gibt es keinen schlechthin besten methodischen Ansatz, sei es nun ein Optimierungs-, Input-Output- oder Simulationsansatz. Jede der für Modelluntersuchungen zur Verfügung stehende Methode hat gewisse spezifische Vor- und Nachteile und es gilt die geeignetste im Hinblick auf die Zielsetzungen der Modellentwicklung auszuwählen.

Nur vor diesem Hintergrund lassen sich einige allgemeine Zielsetzungen der Energiemodellentwicklung formulieren. Sie sind in Tafel 3 aufgelistet.

**TAFEL 3: ALLGEMEINE ZIELE DER ENERGIEMODELL-  
ENTWICKLUNG**

ADÄQUATE DARSTELLUNG KOMPLEXER ZUSAMMENHÄNGE

QUANTITATIVE DARLEGUNG DER GEMACHTEN ANNAHMEN

VERBESSERUNG DER INTERDISZIPLINÄREN KOMMUNIKATION

ERARBEITUNG VON ENTSCHEIDUNGSHILFEN

Zunächst ist dies die konsistente Darstellung der komplexen Problemzusammenhänge, d.h. die in sich widerspruchsfreie vereinfachte Abbildung der Realität. Mathematische Modelle sind hierfür besonders geeignet. Sie erfordern die quantitative Festlegung der gemachten Hypothesen und Annahmen und schaffen damit die Voraussetzungen, die Sensitivität der Modellergebnisse in bezug auf die gemachten Annahmen und Hypothesen zu analysieren. Damit ist auch das zweite Ziel schon angesprochen. Da, wie vorher schon erläutert, die heutigen Energieprobleme über die Grenzen einzelner Wissenschaftsdisziplinen weit hinausgehen, ist eine funktionierende interdisziplinäre Kommunikation eine nicht unwesentliche Voraussetzung für die Lösung der anstehenden Probleme. Obwohl es gerade im Zusammenhang mit der Modellentwicklung einige markante Beispiele von interdisziplinären Verständigungsschwierigkeiten gibt, bin ich der Auffassung, daß Modelle, gerade wegen der Verwendung einer einheitlichen Sprache, zur Überwindung der interdisziplinären Kommunikationsprobleme beitragen können. Zu dem letzten, wohl wichtigsten Ziel der Energiemodellentwicklung ist zuvor schon etwas gesagt worden. Am Schluß meiner Ausführungen werde ich darauf noch einmal zurückkommen.

### 3. Energiemodellentwicklungen in der BRD

In diesem Abschnitt sollen nun einige Energiemodelle näher erläutert werden, die innerhalb

der Bundesrepublik Deutschland entwickelt worden sind. Es handelt sich dabei nicht um Modelle für einzelne Bereiche der Energieversorgung, z.B. die Ausbauplanung von Kraftwerkssystemen, über die ja an anderer Stelle dieser Tagung schon ausführlich berichtet wurde, sondern um Modelle, die das gesamte Energieversorgungssystem und die Beziehungen zu seiner Umgebung abbilden sollen. Die Beschreibung der einzelnen Modelle kann dabei natürlich nicht ins Detail gehen. Es soll vielmehr versucht werden, die Zielsetzungen, den methodischen Ansatz und den Aufbau des jeweiligen Modells zu umreißen, mit der Absicht damit einen Überblick über den Stand und die notwendige Weiterentwicklung der Energiemodellentwicklung in der Bundesrepublik Deutschland zu geben. Wegen der Kürze der Zeit ist es außerdem nicht möglich, auf alle Modellansätze einzugehen. Für diejenigen, die an einem umfassenderen Überblick und an detaillierten Beschreibungen der Modellansätze interessiert sind, sei deshalb auf die im Schriftum aufgeführten Arbeiten verwiesen.

#### 3.1 Das energiesektorale Informationssystem ENIS

Das energiesektorale Informationssystem "ENIS" /4/ wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie finanzierten Forschungsvorhabens "Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Datenverarbeitung zur Planungshilfe in der Bundesverwaltung" vom Zentrum für Zukunftsforschung e.V. in Berlin entwickelt. Ziel der Modellentwicklung war es, ein Instrumentarium zu erstellen, das die Untersuchung von Alternativen hinsichtlich der Förderung und des Einsatzes von Energieträgern sowie die Auswirkung dieser Alternativen auf die Umwelt und die Kosten ermöglicht.

Das gesamte Modell ist in drei Ebenen aufgebaut. Ausgehend von dem Endenergiebedarf der Volkswirtschaft errechnet das Produktionsmodell bei Vorgabe der Struktur der Energieumwandlung und einer bestimmten energieaußenwirtschaftlichen Situation eine Bilanz der Energieflüsse, in der die Mengen der Gewinnung, des Umwandlungsausstoßes, des Eigenverbrauchs und der Verluste für die einzelnen Energieträger und Bereiche ausgewiesen werden. Ausgehend von diesen Werten über die Gewinnung, die Umwandlung und den Verbrauch der einzelnen Energieträger erstellt das Umweltmodell eine Schadstoffbilanz für die wichtigsten Schadstoffe. Unter Annahme bestimmter Energiepreise werden im Kostenmodell die Energiekosten in verschiedenen Bereichen ermittelt. Das Modell ist so angelegt, daß die Auswirkungen von politischen, ökonomischen und ökologischen Maßnahmen auf die Energiekosten aufgezeigt werden können.

ENIS ist ein Simulationsmodell, das es dem Benutzer ermöglicht, durch Veränderung von Parametern Fragen zur Struktur und Entwicklung des Energiesektors und seiner Auswirkungen auf die Umwelt zu untersuchen. Die Simulation erfolgt dabei für vorzugebende Jahres-schritte. Das Modell besteht zum überwiegenden Teil aus einem System von Bilanzgleichungen.



### 3.2 Das multisektorale Energie- und Umweltplanungsmodell der Universität Münster

Im Rahmen der Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 26 "Raumordnung und Raumwirtschaft" der Universität Münster ist von H. Döllekes ein multisektorales Energie- und Umweltplanungsmodell erarbeitet worden /5/. Hauptziel der Arbeit war es, einen operationalen Lösungsansatz für eine integrierte Planung der Energie- und Umweltpolitik zu entwickeln.

Die Grundkonzeption des Modells bilden

- Güterbilanzen, die in Form der traditionellen Input-Output-Analyse die interdependenten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wirtschaftssektoren beschreiben,
- Energiebilanzen, die den Energiefluß von der Gewinnung bis zur Verwendung darstellen und
- Schadstoffbilanzen, in denen die Emissionen produktionstechnischer und energietechnischer Aktivitäten erfaßt werden.

Diese linearen Beziehungen der industriellen Vorleistungsverflechtung, der Energiebilanz und der Schadstoffbilanzen sind in ein lineares Programmierungsmodell eingebettet, dessen Zielfunktion die Maximierung des Bruttoinlandsproduktes ist. Der entwickelte Ansatz ist zunächst statischer Natur, eine Dynamisierung ist aber geplant. Darüber hinaus ist, wegen der schwerpunktmäßigen Ausrichtung dieses Modells auf die Umweltproblematik auch eine Regionalisierung des Ansatzes vorgesehen.

### 3.3 Das Energiemodellsystem der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung der KFA Jülich

Die Arbeiten zur Entwicklung von Energiemodellen in der Kernforschungsanlage Jülich reichen bis in die späten sechziger Jahre zurück. Ausgangspunkt war die Entwicklung von Modellen zur Ausbauplanung von Kraftwerkssystemen /6/. Über derartige Modelle ist auf dieser Tagung ja schon ausführlich berichtet worden. Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erfahrungen begannen etwa vor vier Jahren die Arbeiten zur Entwicklung von Modellen für das gesamte System der Energieversorgung. Das generelle Ziel der Modellentwicklungsarbeiten ist es, ein Instrumentarium für die Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten des Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland und für den Vergleich alternativer Energieversorgungsoptionen zu schaffen. Dabei sollen insbesondere die Interdependenzen des Energiesystems mit seiner Umgebung, wie z.B. der übrigen Wirtschaft und der Umwelt berücksichtigt werden.

Die Arbeiten begannen mit der Entwicklung von Modellen zur Analyse der weltweiten Energieprobleme und zwar aus den folgenden zwei Gründen:

1. In der Regel sind geschlossene Systeme - und die Welt kann man als solches auffassen - leichter in einem Modell abzubilden und
2. in der Regel sind natürlich die weltweiten Entwicklungen auch dominant für die Entwicklung des Energiesystems in der Bundesrepublik Deutschland. So haben z.B.

die Erschöpfung der Erdölreserven oder die Preisentwicklung des Erdöls einen großen Einfluß auf die Energiewirtschaft der BRD. Beide werden aber nur im geringen Maße von der BRD selbst beeinflusst.

Die globalen Modelle sollen der Ermittlung der weltweiten Randbedingungen für die Entwicklung des Energiesystems der BRD dienen, die dann in das nationale Modell einfließen.

Wenig später wurde die Entwicklung der Energiemodelle für die BRD in Angriff genommen, die heute den Schwerpunkt der Arbeiten bildet. Wie schon zuvor erläutert, hat die zu analysierende Problemstellung einen entscheidenden Einfluß auf die Art und den Aufbau des Modells. Aus diesem Grunde ergab es sich nahezu zwangsläufig, daß sich mit der Bearbeitung neuer Fragestellungen die Zahl der Modelle oder der modifizierten Modellteile für bestimmte Bereiche vergrößerte. Um dennoch auf die einmal erstellten Modelle bei der Bearbeitung neuer Fragestellungen so weit wie möglich aufbauen zu können und um dem Benutzer die Handhabung mit den Modellen zu erleichtern, wurde der Aufbau einer Modellbank in Angriff genommen. Die Idee ist, für die im Rahmen der Energieproblematik wichtigen Sektoren und Bereiche, wie z.B. die Wirtschaft, die Energieversorgung und die Umwelt, Teilmodelle in der Modellbank abgespeichert zu haben. Die hinsichtlich ihrer Detaillierung und Disaggregation sowie hinsichtlich ihres methodischen Ansatzes unterschiedlichen Teilmodelle, sollen dann jeweils entsprechend der Frage- und Problemstellung zusammengekoppelt werden. In Tafel 4 sind die bereits entwickelten und in Entwicklung befindlichen Teilmodelle aufgelistet.

Zur Beschreibung der wirtschaftlichen Entwicklung der Bundesrepublik stehen ein dynamisches makroökonomisches Modell und ein Input-Output-Modell (56 Sektoren) zur Verfügung. In dem makroökonomischen Modell ist die Wirtschaft in sechs Sektoren disaggregiert, deren Entwicklung jeweils durch eine Produktionsfunktion und unter Berücksichtigung der interindustriellen Verflechtung beschrieben wird. Ausgehend von der volkswirtschaftlichen und sektoralen Entwicklung ermitteln die Energiebedarfsmodelle den Nutz- bzw. Endenergiebedarf nach Energieträgern für die Bereiche Industrie, Haushalte, Kleinverbraucher und Verkehr.

Zur Abbildung des Energieversorgungssystems stehen ein Energieflußmodell und ein lineares Optimierungsmodell zur Verfügung. Das Energieflußmodell ermittelt den bei vorgegebener Umwandlungsstruktur notwendigen Einsatz von Primärenergie zur Deckung eines bestimmten Endenergiebedarfs, während das Optimierungsmodell die "kostenoptimale" Allokation der Primär- und Sekundärenergieträger unter einer Reihe von Nebenbedingungen errechnet. Zur Beschreibung der aus produktionstechnischen und energetischen Aktivitäten resultierenden Umweltbelastung steht ein Emissionsmodell für acht Schadstoffe zur Verfügung.

Auf die Aufgabe der globalen Modelle ist schon kurz eingegangen worden. Es sei nur noch bemerkt, daß neben dem globalen Energiemodell Modelle zur Analyse des CO<sub>2</sub> und Tritiumproblems entwickelt wurden.



## TAFEL 4: TEILMODELLE DER MODELLBANK

WIRTSCHAFTSMODELLE

- DYNAMISCHES MAKROÖKONOMISCHES MODELL  
(6 WIRTSCHAFTSSEKTOREN)
- INPUT-OUTPUT-MODELL

ENERGIEBEDARFSMODELLE

- INDUSTRIE
- HAUSHALTE
- KLEINVERBRAUCHER
- VERKEHR

ENERGIEVERSORGUNGSMODELL

- ENERGIEFLUSSMODELL
- OPTIMIERUNGSMODELL

UMWELTMODELL

- EMISSIONSMODELL
- GLOBALE MODELLE
- ENERGIEMODELL-SCHADSTOFFKREISLAUF-MODELLE (CO<sub>2</sub>,T)
- (STANDORTMODELL)

IMPACT MODELLE

- NETTOENERGIEMODELL
- PRODUKTIONS-IMPACT-MODELL

Einen wichtigen Aspekt der Weiterentwicklung des Modellsystems stellt die Regionalisierung dar. Hierunter ist die Entwicklung von Modellen zu verstehen, die explizit die Ortsabhängigkeit von Systemgrößen erfassen, was für die Analyse von Energietransport und -verteilungsproblemen sowie für die Standortproblematik unumgänglich ist. Die Arbeiten hierzu befinden sich noch in der Anfangsphase.

Unter dem Begriff "Impact Modelle" sind spezielle Modelle zur detaillierten Beschreibung der Wirkungen von Energietechnologien bzw. Energieversorgungsstrategien zu verstehen. Etwa zur Beantwortung der Frage, ob dem Ausbau von kapitalintensiven Energietechnologien wie z.B. der Kern- oder Sonnenenergienutzung Grenzen durch die Produktionsmöglichkeiten gewisser industrieller Sektoren gesetzt sind. Zur Beantwortung dieser oder ähnlicher wichtiger Fragen soll das Produktions-Impact Modell einen Beitrag leisten, in dem es sowohl die direkten als auch die indirekten Erfordernisse alternativer Energieversorgungsstrategien in bezug auf die Güterlieferungen der anderen Wirtschaftssektoren ermittelt, die für die Investitionen und den Betrieb des Energieversorgungssystems notwendig sind.

Das in Tafel 4 unter der Rubrik Impact-Modelle aufgeführte Nettoenergiemodell soll nun näher erläutert werden. Eine ausführlichere Beschreibung der wichtigsten anderen Teilmodelle der

Modellbank wird, ebenso wie eine Darstellung exemplarischer Ergebnisse von Modellrechnungen, im nächsten Vortrag gegeben. Siehe auch /3, 7, 8, 9/.

4. Nettoenergiebilanzen

Zur Herstellung eines jeden Produktes muß Energie in Form von Wärme, Licht, Kraft oder chemischer Energie aufgewendet werden. Dies trifft natürlich auch auf die Erzeugung und Bereitstellung einer Kilowattstunde elektrischer Energie für den Verbraucher zu. Einmal muß Energie während des Kraftwerksbetriebs zur Bereitstellung des Brennstoffs und zur Deckung des Eigenbedarfs aufgewendet werden. Zum anderen wird bereits vor der Inbetriebnahme des Kraftwerks Energie zur Produktion der Bau- und Ausrüstungsinvestitionen und zu ihrer Installation benötigt.

Aktueller Anlaß zur Entwicklung des Nettoenergiemodells war die Frage, ob bei dem geplanten Ausbau der Kernenergie mehr Energie für den Bau und Betrieb der Kraftwerke verbraucht wird als die bereits fertiggestellten Kernkraftwerke selbst liefern können /10/. Wäre dies der Fall, so würde der Ausbau der Kernenergie unsere Abhängigkeit von den fossilen Primärenergieträgern nicht vermindern können.

Bevor nun auf die Berechnung des Energieaufwandes eingegangen wird, müssen noch einige Begriffe allgemein definiert werden.

Der Energieaufwand ist die Energie, die zur Produktion des betrachteten Gutes unter Berücksichtigung aller Vorleistungen erforderlich ist. Güter können sowohl Energieträger wie Strom, Treibstoffe etc. als auch Nicht-Energieträger, Waren und Kapitalgüter sein. Falls zur Produktion von Gütern eine Energieumwandlung stattfindet, wie z.B. im Kraftwerk bei der Umwandlung von Kohle zu Strom, dann wird der Energieinhalt des Produktes, in unserem Beispiel also der elektrische Strom, nicht zum Aufwand gerechnet, wohl aber die Energie, die als Abwärme bei der Umwandlung verlorenggeht.

Der Energieaufwand läßt sich aufteilen in einen direkten und indirekten Anteil. Der direkte Energieaufwand ist die Energie, die in Form von Energieträger direkt in die Produktion des betrachteten Gutes fließt, während der indirekte Anteil in Form von Hilfsstoffen und sonstigen Vorleistungen - zu deren Erstellung ja auch Energie benötigt wurde - in den Prozeß fließt.

Nach diesen Definitionen wollen wir uns nun der Berechnung des Energieaufwandes zuwenden.

Es gibt grundsätzlich zwei methodische Vorgehensweisen für die Ermittlung des Energieaufwandes. Die eine Möglichkeit besteht darin, sämtliche Energieanteile, die zur Herstellung eines Produktes aufgewendet werden, in den einzelnen vorgelagerten Produktionsprozessen schrittweise zurückzuverfolgen. Dieses Verfahren bezeichnet man als Prozeßkettenanalyse. Die zweite Möglichkeit der Berechnung des Energieaufwandes bedient sich der Systematik der Input-Output-Rechnung. Eine Input-Output-Tabelle, wie sie schematisch



in Bild 1 dargestellt ist, stellt die wertmäßige Verflechtung der Sektoren einer Volkswirtschaft dar. Das Matrixelement  $A_{ij}$  gibt dabei den wertmäßigen Anteil der Vorleistungen des Wirtschaftssektors  $i$  am Gesamtoutput, d.h. an der Gesamtproduktion, des Sektors  $j$  an. Die Gesamtproduktion  $X_i$  des Sektors  $i$  verteilt sich auf seine Lieferungen an die anderen Wirtschaftssektoren - hier mit  $\sum_{j=1}^n A_{ij} X_j$  bezeichnet - und auf seine Lieferungen an den Endverbrauch  $Y_i$ . Dieser Zusammenhang läßt sich in Matrixschreibweise folgendermaßen darstellen

$$X = A X + Y \quad (1)$$

Die Auflösung dieses linearen Gleichungssystems nach  $X$  ergibt

$$X = (I - A)^{-1} Y = C X \quad (2)$$

mit  $I \hat{=} \text{Einheitsmatrix}$ .

$C$  wird in der Ökonomie die inverse Leontief-Matrix genannt. Die Elemente dieser Matrix  $C_{ij}$  geben an, wie viele Werteeinheiten des Sektors  $i$  insgesamt produziert werden müssen, damit der Sektor  $j$  eine Werteeinheit an die Endnachfrage liefern kann. Ordnet man nun den durch die Input-Output-Tabelle beschriebenen wertmäßigen Produktionsströmen der einzelnen Sektoren Energieströme zu, wie dies schematisch in Bild 2 dargestellt ist, so erhält man schließlich eine Matrix, deren Elemente angeben, wieviel Energie insgesamt, d.h. unter Ein-schluß aller vorgelagerten Produktionsschritte aufzuwenden ist, um eine Werteeinheit eines Gutes für den Endverbrauch zu liefern. Formal erfolgt dies durch die Multiplikation der inversen Leontief-Matrix  $C$  mit einer Matrix  $R$ , deren Elemente  $R_{ij}$  die spezifischen direkten Energielieferungen an den Produktionssektor  $j$  bedeuten

$$R_{ij} = \frac{E_{ij}}{x_j} \quad (3)$$

mit  $E_{ij}$  = direkter Energieverbrauch des Energieträgers  $i$  im Sektor  $j$   
 $x_j$  = Gesamtoutput des Sektors  $j$

Die direkten Energieverbräuche der einzelnen Sektoren werden, wie in Bild 2 dargestellt, aus der Energiebilanz gewonnen.

Als Ergebnis einer derartigen Modellrechnung, die ein Input-Output-Modell mit der Energiebilanz verknüpft, erhält man die gesamten spezifischen Energieaufwendungen für die Produktion der verschiedenen Industrie-sektoren, gemessen z.B. in kg SKE/100 DM Produktionswert. In Bild 3 sind die Ergebnisse einer Modellrechnung für die Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1972 dargestellt. Ausgewiesen ist dabei neben dem gesamten spezifischen Energieaufwand von 31 Wirtschaftssektoren auch der direkte und indirekte Anteil.

Im folgenden werden einige Ergebnisse diskutiert. Den höchsten spezifischen Energieaufwand von allen Wirtschaftssektoren hat der Sektor Elektrizitäts- und Fernwärmewirtschaft. Der spezifische Energieaufwand besteht dabei zu 70 % aus direkten und zu 30 % aus indirekten Aufwendungen.

Der hohe spezifische Energieaufwand und der hohe Anteil des direkten Energieaufwandes erklären sich durch den geringen Kraftwerkswirkungsgrad.

Sektor	1	...	j	...	Y	$\Sigma$
1						$X_1$
...						
i			$A_{ij}$		$Y_i$	$X_i$
...						
	$X_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot X_j + Y_i$					

Bild 1. Prinzipielle Darstellung der Input/Output Matrix

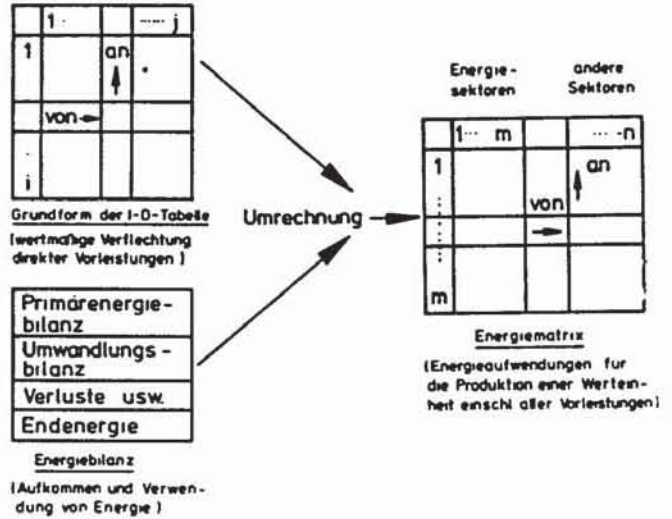


Bild 2. Schema der energetischen Input/Output-Methode

Die Energieverluste bei der Umwandlung sind bedeutend größer als der indirekte Energieaufwand, der z.B. durch den Bau neuer Kraftwerke oder Leitungen entsteht.

Anders sehen die Ergebnisse bei der Gas- und Wasserwirtschaft aus. Der spezifische Energieaufwand ist hier im Vergleich zu den anderen Energiewirtschaftssektoren gering. Er besteht zu 80 % aus indirekten und nur zu 20 % aus direkten Energieaufwendungen. Die indirekten Aufwendungen entstehen dabei durch den Bezug der benötigten Rohre und Armaturen, während die direkten Aufwendungen die Umwandlungsverluste der Ortsgaswerke, die Leitungsverluste und den Pumpstrom für die Wasserversorgung berücksichtigen.

Bei den Industrie-sektoren sind zwei Gruppen von Sektoren deutlich zu unterscheiden. Die eine Gruppe wird von Sektoren gebildet, die vornehmlich der Gewinnung von Rohstoffen und der Erzeugung von Halbzeugen dienen. Diese Sektoren haben hohe spezifische Energieaufwendungen von 70 kg SKE/100 DM (Glas- und Feinkeramik) bis 140 kg SKE/100 DM (eisenschaffende Industrie). Der Anteil des direkten Energieaufwandes beträgt bei diesen Sektoren mehr als 50 %.

Die andere Gruppe besteht aus Sektoren, die überwiegend Halbzeuge verarbeiten. Der spezifische Energieverbrauch dieser Gruppe ist um den Faktor 2 und mehr kleiner.



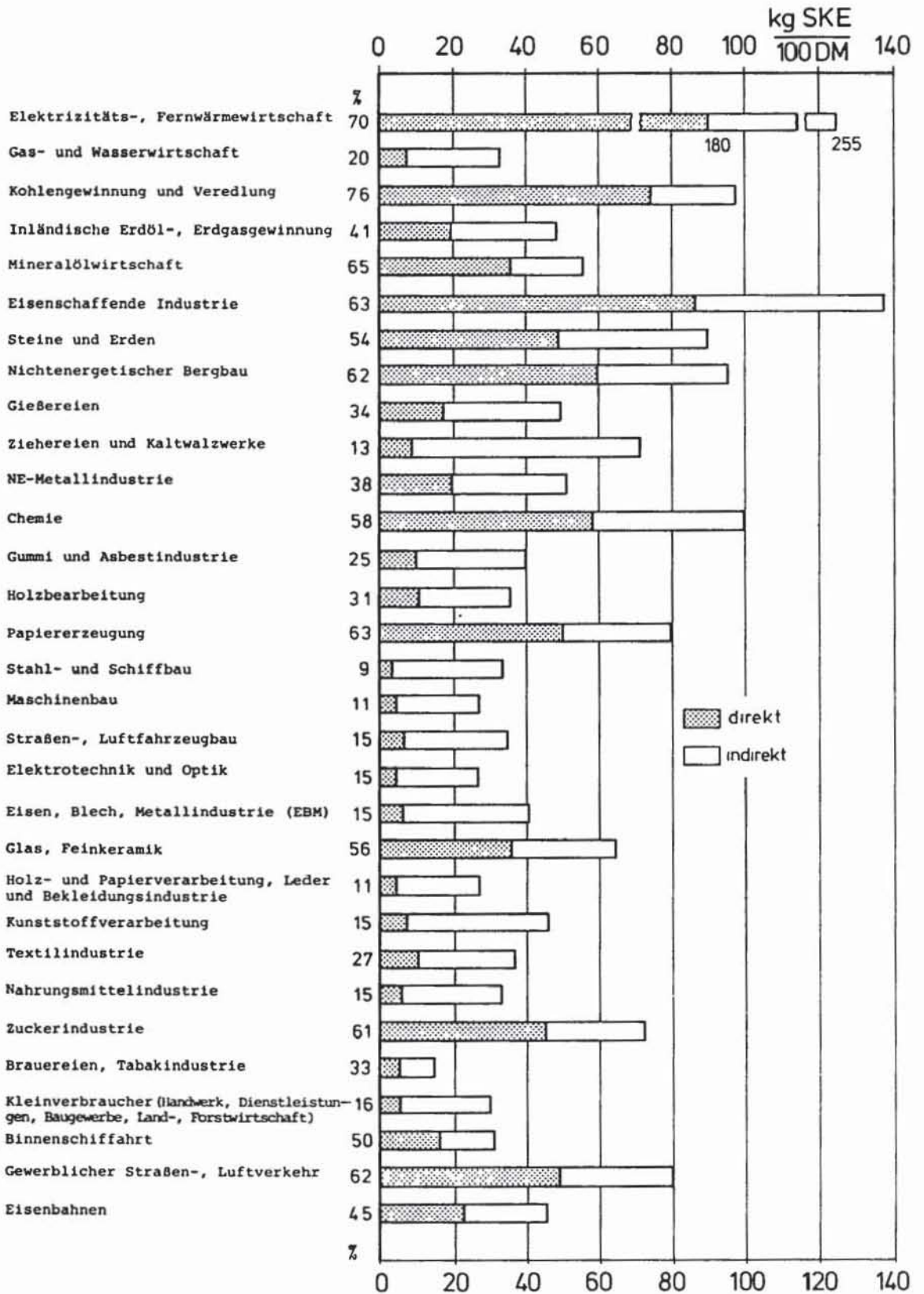


Bild 3. Spezifische Energieaufwendungen der Wirtschaftssektoren in der Bundesrepublik Deutschland 1972

Durchschnitt der Exporte = 48 kg SKE/100 DM  
Die Prozentzahlen geben den Anteil des direkten Energieaufwandes an

ner. Er liegt zwischen 30 kg SKE/100 DM (für z.B. die Elektrotechnik) und 45 kg SKE/100 DM (für die kunststoffverarbeitende Industrie). Der direkte Energieanteil sinkt in diesen Sektoren auf Werte unter 20 %.

Hier wird deutlich sichtbar, daß mit zunehmendem Verarbeitungsgrad der Anteil der Energie an der Wertschöpfung abnimmt und daß die insgesamt benötigte Energie über-

wiegend über den Materialbezug als indirekter Energieaufwand in den Sektor kommt. Ein gutes Beispiel dafür ist der Sektor Stahl- und Schiffbau. Nur 9 % des Energieaufwandes werden in Form von Energieträgern, z.B. Strom zum Schweißen, in den Sektor eingeführt. Über 90 % des Energieaufwandes gelangt über den Stahl- und Materialbezug als indirekte Energie in den Sektor.

Obwohl die Ergebnisse für Sektoren mit homogener Produktstruktur, z.B. Eisenschaffende Industrie, gut zu gebrauchen sind, ist bei einigen Sektoren Vorsicht geboten. Hier zeigen sich die Grenzen der Aussagefähigkeit, die im wesentlichen durch den zu geringen Disaggregierungsgrad, den die Input-Output Tabelle und die Energiebilanz zulassen, bestimmt werden. So faßt der Sektor NE-Metallindustrie die Kupfer- und Aluminiumproduktion zusammen, obwohl der Energiebedarf zur Aluminiumherstellung bis zum Faktor 5 höher sein kann als bei der Kupferproduktion. Deshalb ist der hier erhaltene Mittelwert nicht auf Technologien anwendbar, die nur Kupfer oder Aluminium benötigen. Für diese Technologien müssen Werte über Prozeßkettenanalysen errechnet werden.

Die mit Hilfe dieses Nettoenergiemodells gewonnenen Ergebnisse, bilden die Grundlage für die Beantwortung einer Reihe interessanter Fragen, wie z.B. nach dem Energieaufwand verschiedener Energiesparmaßnahmen. Im folgenden sollen kurz die Ergebnisse der schon erwähnten Nettoenergiebilanz verschiedener Kraftwerkstypen erläutert werden.

In Bild 4 sind die Energieaufwendungen zur Erstellung von Kraftwerken für einen Leicht-

wasserreaktor (LWR), Hochtemperaturreaktor (HTR), Schnellen Brutreaktor (SBR) und zum Vergleich für ein Steinkohlenkraftwerk aufgetragen. Für die nuklearen Anlagen ist zusätzlich noch der Energieaufwand für das Erstcore aufgeführt. Die Anlageinvestitionen umfassen dabei alle Aufwendungen bis zur schlüsselfertigen Übergabe der Kraftwerksanlage. Da für den schnellen Brutreaktor bisher keine zuverlässigen Angaben über den Investitionsaufwand vorliegen, wurde hier von dem Schätzwert ausgegangen, daß seine Kosten 50% über denen des Hochtemperaturreaktors liegen.

Beim Energieaufwand für das Erstcore sowie beim Energieaufwand für die Bereitstellung des Brennstoffs (Bild 5) wurde jeweils nach dem verwendeten Anreicherungsverfahren und der Urankonzentration unterschieden, die den Hauptanteil des dabei anfallenden Energieaufwandes ausmachen. Eine mittlere Urankonzentration von 0,2% entspricht etwa dem Gehalt der heute abgebauten Uranerze, während 0,02% etwa die Erzkonzentration darstellt, die bei dem erwarteten Uranbedarf im Jahre 2000 abgebaut werden würde, wenn man nur die heute bekannten sicheren und wahrscheinlichen Reserven zugrundelegt. Die Ergebnisse zeigen, daß der notwendige höhere Energieaufwand beim

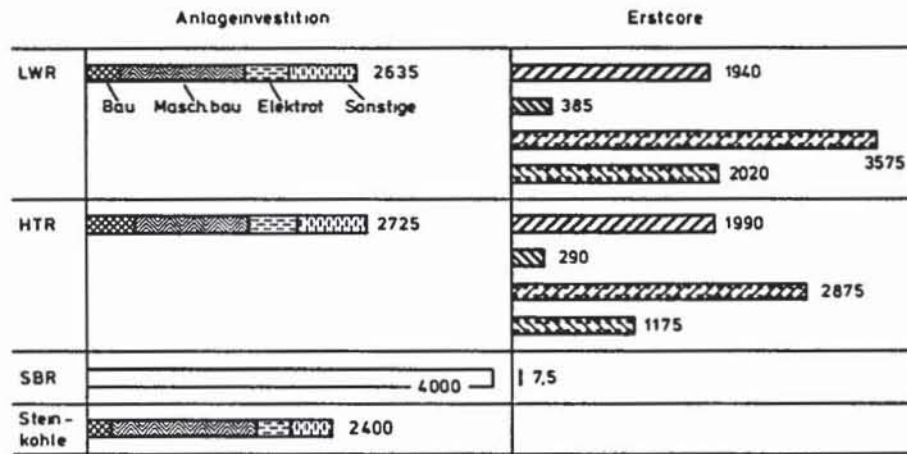


Bild 4. Spezifischer Energieaufwand für Anlageinvestitionen und Erstcore (MWh<sub>FEQ</sub>/MW<sub>el</sub>)

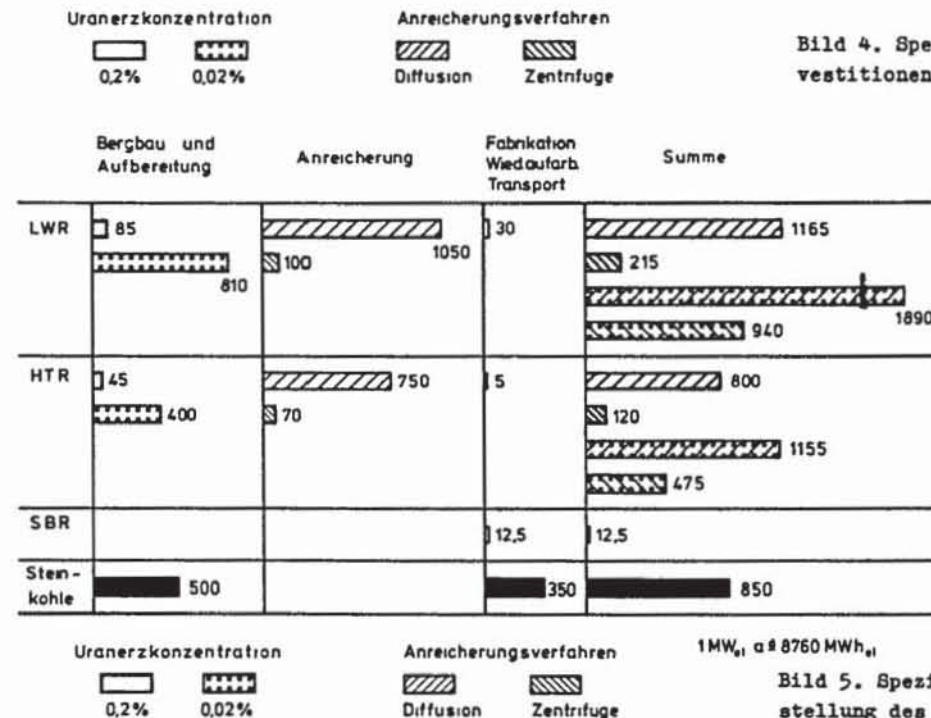


Bild 5. Spezifischer Energieaufwand für die Bereitstellung des Brennstoffs (MWh<sub>FEQ</sub>/MW<sub>el</sub>-a)



Tafel 5: Kumulierter Energieaufwand und Nettowirkungsgrad

	Kumulierter Energieaufwand <sup>2)</sup>		Technischer Wirkungsgrad %	Nettowirkungsgrad / % /	
	/GWh <sub>PEQ</sub> /MW <sub>el</sub> /	Zentrifuge		Diffusion	Zentrifuge
LWR	0,2% (17,9%) <sup>1)</sup>	25,5 (43,8%) <sup>1)</sup>	33,0	31,4	32,5
	0,02% (15,4%)	40,2 (21,6%) <sup>1)</sup>			
HTR	0,2% (24,7%) <sup>1)</sup>	19,1 (58,3%) <sup>1)</sup>	39,0	37,3	38,5
	0,02% (21,2%) <sup>1)</sup>	26,4 (31,3%) <sup>1)</sup>			
SBR		4,23 (94,5%) <sup>1)</sup>	39,0		38,61
Steinkohle		18,34 (13,1%) <sup>1)</sup>	39,0		37,37

1) Anteil Energieaufwand für Anlage und Erstcore am gesamten Energieaufwand

2) Während der gesamten Lebensdauer

3) bei Vollast

Übergang zu niedrigeren Uranerzkonzentrationen durch einen gleichzeitigen Übergang von einer Anreicherung nach dem Diffusions- auf das Zentrifugenverfahren überkompensiert werden kann. Vergleicht man die einzelnen Kernkraftwerkstypen untereinander, so ist der Energieaufwand für die Anlage einschließlich des Erstcores etwa gleich, wobei die Angaben für den Schnellen Brüter mit einem größeren Unsicherheitsfaktor behaftet sind.

Ausgehend von diesen Werten läßt sich nun der gesamte über die Lebensdauer des Kraftwerks kumulierte Energieaufwand ermitteln, der dann zur Berechnung des sogenannten Nettowirkungsgrades des Kraftwerks benutzt werden kann. In Tafel 5 sind der kumulierte Energieaufwand, der technische Wirkungsgrad sowie der sich daraus ergebende Nettowirkungsgrad für die verschiedenen Kraftwerke zusammengestellt. Die Zahlenwerte in den Klammern geben dabei den Anteil für den Bau der Anlage einschließlich des Erstcores an. Mit 13,1% ist dieser Anteil beim Steinkohlenkraftwerk am geringsten. Die Zahlen des Energieaufwandes spiegeln deutlich den Einfluß der Uranerzkonzentration und des Anreicherungsverfahrens wieder. Für den LWR und HTR schwanken der gesamte Energieaufwand je nach Anreicherungsverfahren und Urankonzentration fast um 600%. Für den günstigsten Fall (Urankonzentration 0,2% und Zentrifugenanreicherung) liegt ihr Energieaufwand wesentlich unter dem eines Steinkohlenkraftwerks.

Für den Hochtemperaturreaktor gilt dies auch noch beim Übergang auf eine Urankonzentration von 0,02%. Der kumulierte Energieaufwand des Schnellen Brutreaktors beträgt mit 4,23 GWh<sub>PEQ</sub>/MW<sub>el</sub> nur etwa 23% des eines Steinkohlenkraftwerks.

Die Nettowirkungsgrade liegen um 0,4 bis 2,5%-Punkte unter dem technischen Wirkungsgrad. Dabei ist der der LWRs naturgemäß am geringsten, weil sein technischer Wirkungsgrad mit 33% schon wesentlich geringer ist als der der anderen Kraftwerke. Für das Steinkohlenkraftwerk errechnet sich der Nettowirkungsgrad zu

37,37%. Er liegt damit wesentlich unter dem des Schnellen Brutreaktors und auch der Hochtemperaturreaktor erzielt bei Einsatz der Zentrifugenanreicherung bessere Werte. Dies gilt auch für die niedrige Urankonzentration von 0,02%.

##### 5. Energiemodelle und Entscheidungsträger

Die vorhergehenden Ausführungen dienten im wesentlichen der Erläuterung der Zielsetzungen und des Entwicklungsstandes der gesamtwirtschaftlichen Energiemodelle. Für die Erarbeitung von Entscheidungshilfen bei der Energieplanung ist natürlich die Entwicklung von Energiemodellen nur der erste wichtige Schritt, dem die Einbeziehung und die Umsetzung der Modellergebnisse im Rahmen des Entscheidungsprozesses folgen muß, soll die Modellentwicklung nicht nur akademischen Nutzen haben. Da die Modellentwicklung heute einen Stand erreicht hat, der erste brauchbare Resultate für die Energieplanung erwarten läßt, scheint es nun geboten, die bisher etwas vernachlässigten Probleme der Einbindung von Modelluntersuchungen in den Entscheidungsprozeß verstärkt anzugehen.

Aus diesem Grunde erscheint es mir wichtig, gerade auf dieser Tagung, abschließend dazu noch einige kritische Gedanken zu äußern.

Alle an der Modellentwicklung Beteiligten sind darüber einig, daß die direkte Einbeziehung von Modelluntersuchungen in den Entscheidungsprozeß nur über eine intensive Kommunikation mit dem Entscheidungsträger selbst erfolgreich sein kann. Unterschiedlich sind nur die Auffassungen wie dies zu erreichen ist. Einige propagieren den Weg der direkten Kommunikation des Entscheidungsträgers mit dem Modell als Lösung des Problems. Dabei soll der Entscheidungsträger sich in einem wechselseitigen Dialog mit dem Modell an einem Terminal die entscheidungsrelevanten Informationen generieren. Sowohl aus sachlichen wie auch aus

zeitökonomischen Gründen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, scheint dies jedoch kein praktikabler Weg zu sein. "Direkte Kommunikation mit dem Modell bleibt Stabsarbeit. Bei der stabinternen Arbeit hat natürlich auch das Dialogmodell seinen Platz" /11/.

Der erfolgversprechendere Weg liegt vielmehr in einer intensiven wechselseitigen Kommunikation zwischen dem Entscheidungsträger und dem Modellbauer bzw. Modellbenutzer. Die Formulierung "wechselseitige Kommunikation" ist hier bewußt gewählt worden und soll auf die jeweils spezifische Rolle und Verantwortlichkeit beider im Rahmen dieses Prozesses hinweisen, die es nun näher zu erläutern gilt.

Erwartet der Entscheidungsträger praktische verwertbare Ergebnisse von dem Modellprojekt, so ist gewisser Eigenbeitrag von seiner Seite während der gesamten Dauer des Projektes unumgänglich. Er beginnt bei der Formulierung der Fragestellungen, die mit dem Modell analysiert werden sollen und setzt sich fort in den Diskussionen über die Modellstruktur, die Modellhypothesen bis hin zur Analyse der Modellergebnisse.

Die Übertragung der zu Anfang eines Projektes oft nur unscharf beschriebenen Problemstellungen in klar und eindeutig formulierte Fragestellungen, kann nicht vom Modellbauer allein geleistet werden. Bei der Zielformulierung auftretende Mißverständnisse oder die Nichtausräumung zu hoher Erwartungen auf Seiten des Entscheidungsträgers sind aber oft die Grundlage für ein Scheitern des Projektes.

Ist mit dem bisher Gesagten die Verantwortung des Entscheidungsträgers im Rahmen des Modellprojektes grob umrissen, soll nun auf die Rolle des Modellbauers eingegangen werden. Natürlich ist es zunächst seine Aufgabe, das den formulierten Zielsetzungen adäquate Modell zu erstellen. Darüber hinaus kommt ihm aber gerade im Rahmen der "wechselseitigen Kommunikation" die oft unterschätzte Aufgabe zu, dem Entscheidungsträger die nötige Einsicht in das Modell, seine Möglichkeiten und Grenzen zu vermitteln, um ihn damit in die Lage zu versetzen, die Modellergebnisse verstehen, einordnen und bewerten zu können. Die Erstellung einer verständlichen Dokumentation des Modells, die Offenlegung der impliziten und expliziten Hypothesen, sowie eine entscheidungsrelevante Aufarbeitung der Modellergebnisse sind in diesem Zusammenhang Arbeiten die dem Modellbauer keiner abnehmen kann. Hier gibt es sicher noch viel zu tun und es scheint notwendig, daß sich die Modellbauer gerade im Interesse ihrer eigenen Zielsetzungen und um der effektiven Nutzung ihrer Ar-

beiten willen, diesen Aufgaben eine verstärkte Aufmerksamkeit schenken.

## 6. Schrifttum

- 1 Charpentier, J.P.: A Review of Energy Models, No. 1 - May 1974. IIASA, RR-74-10, July 1974
- 2 Charpentier, J.P.: A Review of Energy Models, No. 2 - July 1975. IIASA, RR-75-35, Oktober 1975
- 3 Arbeitsseminar Energiemodelle für die Bundesrepublik Deutschland. Konferenzbericht der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jül-Conf-15, April 1975
- 4 Barstenbinder, J., Illing H., Opalla, F., Rosalski, P.: ENIS - Energiesektorales Informationssystem, Institut für Zukunftsforschung, Berlin 1975
- 5 Dölleke, H.P.: Submodell "Energie und Abgase" in Forschungen aus Raumordnung und Raumwirtschaft. Wissenschaftlicher Arbeitsbericht 1974-1975, Münster, Dezember 1975
- 6 Voss, A.: Strokoop, A Program on Long-Term Investigation of Cost-Optimum Nuclear Power Systems, Input Description. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-759-KG, April 1971
- 7 Rath-Nagel, St.: Alternative Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft in der BRD. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-1203, Juni 1975
- 8 Voss, A.: Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch-Energie-Umwelt. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-982-RG, Juli 1973
- 9 Niehaus, F.: Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energieerzeugung, CO<sub>2</sub> und H<sup>3</sup>, Kernforschungsanlage Jülich Jül-1165, 1975
- 10 Kolb, G., Niehaus, F., Rath-Nagel, St., Voss, A.: Der Energieaufwand für den Bau und Betrieb von Kernkraftwerken. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-1230, August 1975
- 11 Hansmann, F.: Energiemodelle kritisch gesehen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 26. Jg., Heft 6, S. 291-294, 1976