



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG

Programmgruppe
Systemforschung und Technologische Entwicklung

Alternative Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft in der BRD

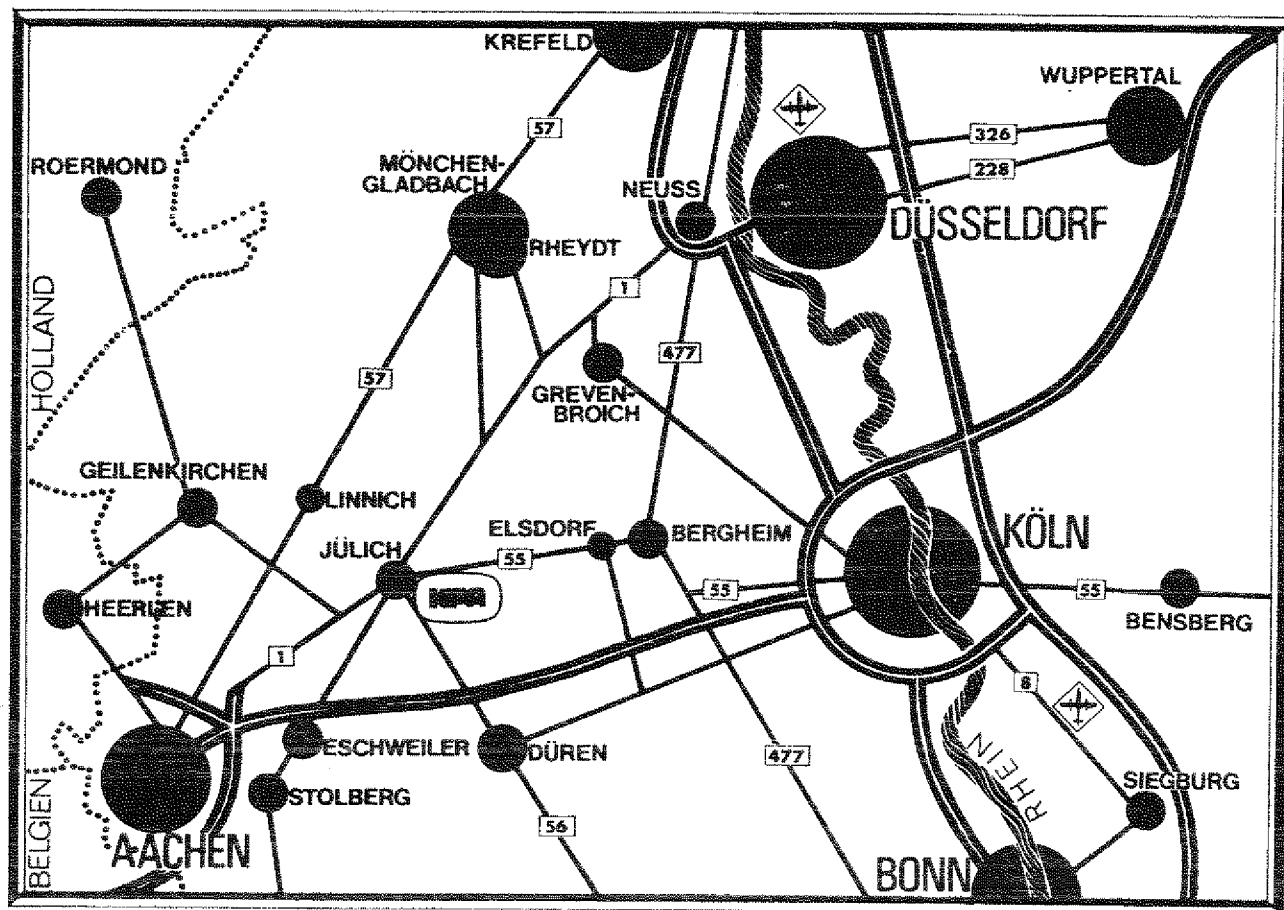
Untersuchung mit Hilfe eines Simulationsmodells

von

S. Rath-Nagel

JüI - 1203
Juni 1975

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1203
 Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung Jülich – 1203

Dok.: Power Economy - Future Aspect
 Power Economy - Federal Republic of Germany
 Power Economy - Model

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Alternative Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft in der BRD

Untersuchung mit Hilfe eines Simulationsmodells

von

S. Rath-Nagel

D 82 (Diss. T. H. Aachen)

Abstract

In the investigation presented here, problem areas of the energy supply as reserves, reliability of supply, environmental pollution and investment and financial questions are discussed. The author tries to represent quantitatively the boundary conditions of our energy supply system and the cause-effect relations determining the energy market. For the Federal Republic of Germany a simulation model consisting of coupled differential equations is developed, which is able to demonstrate the variations of the energy economic structure of supply and demand under various external conditions. There is in particular a close analysis of the strength of feedback between energy consumption and economic growth, the effects of various modes of supply under abnormal conditions and of realizable alternative supply patterns during the investigatory period.

Kurzfassung

In der vorliegenden Untersuchung werden die mit der Energieversorgung verbundenen Problemkomplexe Reserven, Versorgungssicherheit, Umweltbelastung sowie Investitions- und Finanzierungsfragen der Energiewirtschaft diskutiert. Dabei wird versucht, die Randbedingungen unseres Energieversorgungssystems und die Ursache-Wirkungsbeziehungen, die die Entwicklung des Energiemarktes bestimmen, quantitativ darzustellen. Für die Bundesrepublik Deutschland wird ein Simulationsmodell aus gekoppelten Differentialgleichungen entwickelt, das in der Lage ist, die Veränderungen der energiewirtschaftlichen Struktur sowohl auf der Angebots- wie auf der Nachfrageseite unter verschiedenen äußeren Bedingungen aufzuzeigen. Es wird insbesondere analysiert, wie stark die Rückwirkungen zwischen Energieverbrauch und Wirtschaftswachstum sind, welche Auswirkungen einzelne Versorgungsstrategien unter Störfallbedingungen haben können und welche alternativen Versorgungsmuster im Betrachtungszeitraum realisiert werden können.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1	DIE SITUATION DER ENERGIEWIRTSCHAFT IN DER BRD 1
1.1	Die Stellung der Energiewirtschaft in der Gesamtwirtschaft 1
1.1.1	Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Energieversorgung 1
1.1.2	Unternehmen der Energiewirtschaft Definition, Abgrenzung, Besonderheiten 3
1.2	Die Entwicklung des Energiemarktes in der Vergangenheit 8
1.2.1	Die Energienachfrage 8
1.2.2	Das Energieangebot 10
1.3	Die energiewirtschaftliche Problematik 13
1.3.1	Die Grenzen der Energiebedarfsdeckung 13
1.3.2	Energiereserven und Versorgungssicherung 14
1.3.3	Investitions- und Finanzierungsprobleme 31
1.3.4	Umweltprobleme der Energieerzeugung und -nutzung 38
2	ANSÄTZE ZUR ANALYSE MÖGLICHER ENTWICKLUNGEN IM ENERGIEBEREICH 46
2.1	Definition der Untersuchungsaufgabe 46
2.1.1	Anforderungen an die Instrumente der Entscheidungsfindung und Planung 46
2.1.2	Grundsätzliche Eigenschaften von Modellen 48
2.2	Identifizierung der Untersuchungsziele 50
2.2.1	Übergeordnete Ziele und Teilziele 50
2.2.2	Bemerkungen zur Aussagefähigkeit 51
2.3	Auswahl der Untersuchungsmethode 54
2.3.1	Kennzeichen verschiedener Modelltypen 54
2.3.2	Simulationsmethode System Dynamics 57
3	KONZEPTION EINES SIMULATIONSMODELLS FÜR DIE ENERGIEWIRTSCHAFT DER BRD 58
3.1	Die wesentlichen Strukturteile des Modells und der Aggregationsgrad 58
3.2	Die Grundstruktur des Modells 63
3.3	Die Detailstruktur des Modells 67
3.3.1	Bevölkerungs- und Beschäftigungssektor, Kapitalektor, Produktionssektor 67
3.3.2	Nachfragesektor, Investitionssektor 77
3.3.3	Energieverbrauchssektor 86
3.3.4	Energieversorgungssektor 104
4	ERGEBNISSE DER SIMULATIONSRECHNUNGEN 112
4.1	Allgemeine Bemerkungen zu den Simulationsbedingungen 112
4.2	Modellverhalten unter Standardbedingungen 112

	Seite
4.3 Modellverhalten unter speziellen Bedingungen	124
4.3.1 Variation der gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten	124
4.3.2 Variation der Verbrauchsbedingungen	128
4.3.3 Variation der Versorgungssituation	130
4.3.4 Variation der Versorgungsstrukturen	133
4.3.4.1 Verzögerter Einsatz der Kernenergie	133
4.3.4.2 Einführung neuer Technologien	137
 5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN MODELLRECHNUNGEN	 147
 LITERATURVERZEICHNIS	 150

1 DIE SITUATION DER ENERGIEWIRTSCHAFT IN DER BRD

1.1 Die Stellung der Energiewirtschaft in der Gesamtwirtschaft

1.1.1 Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Energieversorgung

Eine der grundlegenden Voraussetzungen für die Erhaltung der Leistungs- und Wachstumsfähigkeit der Volkswirtschaft besteht in der Bereitstellung eines ausreichenden, kontinuierlich verfügbaren Energieangebots. Zum einen wird jede Produktion von Wirtschaftsgütern erst durch den Einsatz des Komplementärgutes Energie ermöglicht. Zum anderen wird Energie zu konsumtiven Zwecken in den privaten Haushalten verbraucht. Die Energieversorgung hat daher innerhalb der gesamten Wirtschaft eine doppelte Funktion, welche das Produktionsergebnis der Wirtschaftsunternehmen einerseits, die Lebensbedingungen des einzelnen andererseits ganz entscheidend beeinflusst.

Je größer die gewerbliche Produktion und je höher der Lebensstandard, desto mehr Energiemengen sind zur Nutzung von Licht, Wärme und Kraft erforderlich, desto größer ist die Abhängigkeit von einer quantitativ und qualitativ ausreichenden Energiedarbietung. Eine Versorgungsstörung durch ein unzureichendes Energieangebot oder der Ausfall eines speziellen Energieträgers, der nicht kurzfristig durch ein Ausweichen auf andere Energieträger ersetzt werden kann, würde für den Verbraucher nur schwer lösbare Probleme aufwerfen.

Die Gefahr einer Unterversorgung war in der Vergangenheit (mit Ausnahme der ersten Jahre unmittelbar nach dem zweiten Weltkrieg) solange bedeutungslos, wie zu jedem Zeitpunkt genügend Energiemengen und -arten vorhanden waren, da der größte Teil des Energiebedarfs durch heimische Energieträger gedeckt werden konnte und der scharfe Wettbewerb unter den konkurrierenden Energieträgern (abgesehen von kurzfristigen saisonalen und regionalen Schwankungen) ständig zu Niedrigpreisen führte /1/. Mit dem Beginn der siebziger Jahre setzte jedoch - zunächst nur punktuell, beschränkt auf einige Märkte und einzelne Energieträger (z.B. Strom, Gas, Mineralöl in verschiedenen Staaten der USA), später dann zunehmend weltweit /2/ - eine Verknappung und Verteuerung des Energieangebots ein, eine Wandlung, die die Umkehr von einem Käufer - zu einem Verkäufermarkt kennzeichnet. Ausgelöst wurde diese Veränderung der Energiesituation durch das zeitliche Zusammentreffen mehrerer Faktoren:

- eine weltweite Hochkonjunktur mit einem ungewöhnlich schnell wachsenden Energiebedarf,
- das Auftreten neuer Partner auf den internationalen Energiemärkten wegen zunehmender Industrialisierung der Entwicklungsländer,
- Verzögerungen beim Bau von Raffinerien und Kraftwerken als Folge eines verstärkten Umweltbewußtseins in allen hochindustrialisierten Ländern,
- das Zurückstellen von Prospektions- und Erschließungsprogrammen der Energieunternehmen aufgrund nicht befriedigender Ertragslage trotz ständiger Abnahme der gesicherten nachgewiesenen Reserven,
- das Bestreben der größten Energieverbraucherländer, vor allem der USA, die nationalen Energiequellen zu schonen, den Energieexport zu verringern und den internationalen Energiemarkt zur Versorgung heranzuziehen,
- den verstärkten Energieeinsatz zur Einsparung von Rohstoffen als Folge einer weltweiten Rohstoffhausse,
- das Bemühen der energieexportierenden Länder durch ein kartellartiges Verhalten auf dem Weltmarkt höhere Energiepreise durchzusetzen.

Nicht nur für den nationalen Energiemarkt, sondern weltweit ist die Deckung eines ständig wachsenden Energiebedarfs inzwischen zu einem Kernproblem geworden, dessen Bewältigung eine Herausforderung an die Wissenschaft, Technik und Wirtschaft darstellt. Denn die aus der veränderten Energiesituation resultierenden potentiellen und realen Versorgungsschwierigkeiten /3/ oder -störungen (allen voraus der Ölboykott der westlichen Welt durch die OPEC-Länder im Winter 1973/74) haben in beängstigender Weise klargemacht, welch ein Machtfaktor der Rohstoff Energie ist und welche entscheidende Rolle eine Beschränkung des Energieangebots für das wirtschaftliche Wachstum von modernen, arbeitsteiligen Volkswirtschaften spielt /4/, /5/.

Notwendige Bedingung für eine gesicherte Energieversorgung ist aber nicht allein der Zugang zum Primärenergiemarkt, sondern in gleichem Maße ist es auch das verfügbare Potential von Anlagen zur Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Energie. Nur wenn die an der Energieversorgung beteiligten Unternehmen ihre Dispositionen so treffen, daß durch Neuinvestitionen die Kapazität der Energieanlagen ständig zunimmt, kann die Energieproduktion mit dem wachsenden Energiebedarf der Verbraucher in Einklang gebracht werden.

1.1.2 Unternehmen der Energiewirtschaft

Definition, Abgrenzung, Besonderheiten

An der Energieversorgung der BRD sind verschiedene Unternehmensgruppen beteiligt, die sich entsprechend der Trennung in Gewinnungs-, Umwandlungs- und Verteilungsbereiche auf unterschiedliche Weise abgrenzen lassen. Als Energiewirtschaft im engeren Sinne der Wirtschaftsstatistik bezeichnet man nach /6/ lediglich die öffentlichen elektrizitäts- sowie gaserzeugenden und -verteilenden Unternehmen. Faßt man unter Energiewirtschaft jedoch allgemeiner (wie im folgenden immer) die Gesamtheit der Unternehmen zusammen, welche sich mit der Primärenergiegewinnung und/oder der Umwandlung und Verteilung von Energie beschäftigen, so können innerhalb der BRD folgende sechs institutionalen Gruppen unterschieden werden:

- Steinkohlenbergbau (und angrenzende Veredelung)
- Braunkohlenbergbau (und angrenzende Veredelung)
- Erdöl- und Erdgasgewinnung
- Elektrizitätserzeugung und -verteilung
- Gaserzeugung und -verteilung
- Mineralölverarbeitung

Darüber hinaus lassen sich industrielle Unternehmensteile, die - vorwiegend für den Eigenbedarf - Energie umwandeln (in Industriekraftwerken, Hüttenkoreien und -gasfabriken) dem Bereich der industriellen Kraftwirtschaft zuordnen. Eine Übersicht über die Leistung der gesamten Energiewirtschaft im Jahre 1972 gibt die Primärenergie- und Umwandlungsseite der Energiebilanz (Tabelle 1).

Die herausragende Stellung, welche die Unternehmen der Energiewirtschaft innerhalb der Gesamtwirtschaft einnehmen, erhält ein besonderes Gewicht, wenn man den Energiefluß vom Verbraucher zum Erzeuger zurückfolgt und die zur Gewinnung einer Einheit Nutzenergie im Mittel erforderliche Menge an Primärenergien abschätzt. Aus Abb. 1 ist ersichtlich, daß die dargebotenen Primärenergien nur in einem sehr begrenzten Umfange in Nutzenergien überführt werden, während der größte Anteil in Form von Verlustenergie an die Umgebung abgegeben wird.

		Steinkohle	Braunkohle	Sonstige ⁽¹⁾	Mineralöl	Gas	Wasserkraft	Kernenergie	Strom	Fernwärme	Insgesamt	Primär- energie	Sekundär- energie
Primärenergie- bilanz	Energiegewinnung im Inland	102,7	29,8	1,7	10,2	20,0	4,1	-	-	-	168,5	168,5	-
	Einfuhr	9,1	1,4	-	203,2	11,5	-	3,1	6,4	-	234,7	170,1	64,6
	Bestandsentnahmen	-	0,2	-	1,3	0,1	-	-	-	-	1,6	-	1,6
	Energieaufkommen im Inland	111,8	31,4	1,7	214,7	31,6	4,1	3,1	6,4	-	404,8	338,6	66,2
	Ausfuhr	22,9	0,4	-	10,6	0,7	-	-	2,3	-	36,9	13,3	23,6
	Bestandsaufstockung und Hochseebunk.	5,5	-	-	8,0	0,1	-	-	-	-	13,6	2,6	11,0
	Primärenergieverbrauch	83,4	31,0	1,7	196,1	30,8	4,1	3,1	4,1	-	354,3	322,7	31,6
Umw.- bilanz	Umwandlungseinsatz	98,0	29,5	0,9	179,1	13,6	4,1	3,1	0,3	-	328,6	291,0	37,6
	Umwandlungsausstoß	41,9	4,8	-	153,8	28,4	-	-	33,8	5,5	268,2	-	268,2
Verbrauch in der Energiegewinnung und in den Umwandlungsbereichen		1,3	1,0	-	5,6	9,5	-	-	4,0	1,0	22,4	2,6	19,8
Fackel- und Leitungsverluste, Bewertungsdifferenzen		-	-	-	-	1,3	-	-	4,3	0,2	5,8	0,4	5,4
Energieangebot im Inland nach Umwandlungsbilanz		26,0	5,3	0,8	165,2	34,8	-	-	29,3	4,3	265,7	28,7	237,0
Nichtenergetischer Verbrauch		2,3	-	-	21,3	2,5	-	-	-	-	26,1	1,2	24,9
Statistische Differenzen		+2,0	-	-0,1	-	-0,4	-	-	-1,2	-	+0,3	+0,8	-0,5
Endenergie- verbrauch	Endenergieverbrauch	25,7	5,3	0,7	143,9	31,9	-	-	28,1	4,3	239,9	28,3	211,6
	darunter	Industrie	14,4	0,9	-	36,4	21,8	-	14,9	1,2	89,6	16,7	72,9
		Verkehr	1,2	-	-	42,2	0,1	-	1,0	-	44,5	1,1	43,4
		Haushalte und Kleinverbraucher Militär, Dienststellen	10,1	4,4	0,7	65,3	10,0	-	12,2	3,1	105,8	10,5	95,3

(1) Brennholz, Torf, Klärschlamm, Müll, Abhitze u.a.

TAB. 1: Energiebilanz der BRD für das Jahr 1972, nach /7/

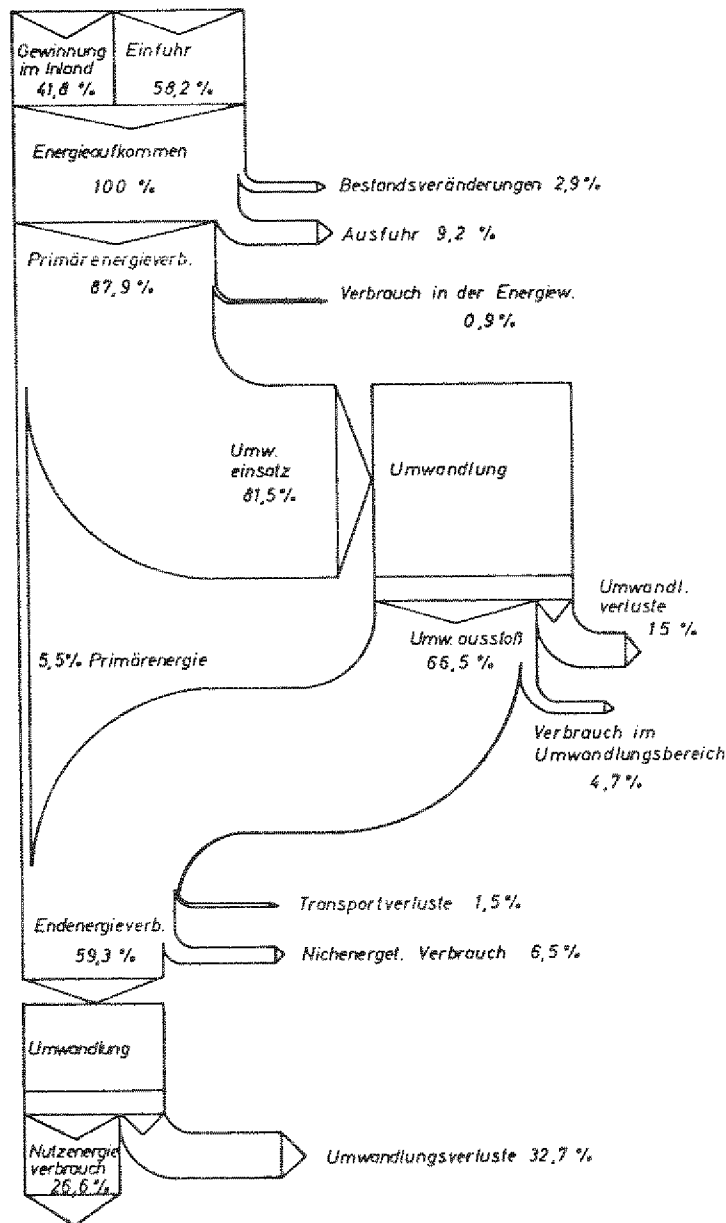


ABB. 1: Energiegewinnung-, -umwandlung und -verteilung in der BRD 1972 nach Anteilen, nach /7/

Die Vergrößerung der Nachfrage beim Endverbraucher hat daher in der Regel einen weit höheren Bedarf an Primärenergien zur Folge. Eine Verbesserung des Nutzungsgrades der dargebotenen Rohenergien macht jedoch erforderlich, daß technischer Fortschritt oder strukturelle Änderungen im Umwandlungsbereich möglich werden, die energieeinsparend wirken. Die somit erzielbaren Reduktionen in der Primärenergiebilanz können nur verzögert, langfristig und entsprechend begrenzt realisiert werden, da die langen Einrichtungszeiten von Energieanlagen eine gewisse Trägheit des Versorgungssystems zur Folge haben. Derzeit beträgt beispielsweise die Spanne, die zwischen Auftragsvergabe und In-

betriebsnahme bei Neu- oder Erweiterungsbauten von Stromerzeugungsanlagen vergeht, etwa 3 Jahre für fossile, rund 6 Jahre für nukleare Kraftwerke /8/, wobei eine je nach Standort verschieden lange Genehmigungsprozedur hinzukommt.

Der Sektor Energiewirtschaft unterscheidet sich durch

- den hohen Eigenleistungsanteil (Energieverbrauch für die Energiegewinnung, -umwandlung und -verteilung),
 - die langen Planungs- und Bauzeiten
- sehr wesentlich von allen übrigen volkswirtschaftlichen Bereichen. Darüber hinaus sind es vor allem drei weitere Faktoren, welche Energieunternehmen charakterisieren:

- die extreme Kapitalintensität
(Sie erfordert hohe Investitionen bei teilweise erst außerordentlich langfristiger Rentabilität /9/. Die Kapitalintensität der Energiewirtschaft war z.B. 1970 rund sechs mal größer als es dem Durchschnitt der Gesamtwirtschaft entsprach /6/.)
- die teilweise begrenzte Lagerungs- und Transportfähigkeit der produzierten Wirtschaftsgüter
(Dies trifft z.B. für die Speicherung und Fortleitung von Strom zu. Die Begrenzung ist hier durch den hohen Aufwand für Pumpspeichieranlagen, Akkumulatoren, Hochleistungsübertragungssysteme bzw. durch die großen Übertragungsverluste gegeben.)
- die Koppelproduktion bei einigen Energieumwandlungen
(z.B. Erzeugung von Koks und Kokereigas beim Verkoken, Erzeugung von Strom und Wärme in Wärmekraftwerken. Erzeugung von Raffineriegas, Flüssiggas, Benzin, Heizöl L, Heizöl S, Bitumen und anderen Kohlenwasserstofffraktionen bei der Rohöldestillation.)

Diesen verfahrensbedingten Besonderheiten, welche die Angebotsseite in bestimmter Weise festlegen, stehen die Forderungen der Verbraucher nach einer flexiblen, wechselnden Marktverhältnissen schnell und bedarfsgerecht angepaßten Versorgung gegenüber. Der Flexibilität sind jedoch durch die langen Planungs- und Bauzeiten zeitliche, durch die extreme Kapitalintensität finanzielle und betriebswirtschaftliche und durch die begrenzte Lagerungs- und Transportfähigkeit, die Koppelproduktion und den hohen Eigenleistungsanteil auch produktions-technische Grenzen gesetzt.

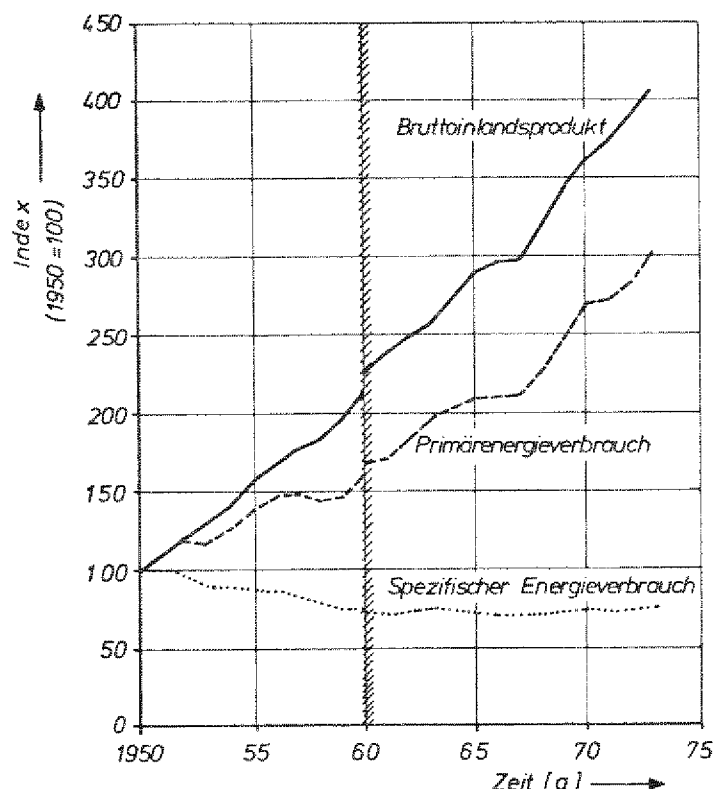
Daraus ergibt sich für die Planung im Energiebereich die Notwendigkeit einer ständigen, genauen und langfristigen Marktanalyse, einer Abschätzung potentieller Störeinflüsse in der Versorgung und der Entwicklung alternativer Versorgungstechnologien. Denn eine einmal eingeschlagene Strategie behält wegen der relativen Starrheit der Angebotsseite und fehlender kurzfristiger Anpassungsmöglichkeiten auf längere Zeit eine entscheidende Funktion für den gesamten Energiemarkt.

Will man den Beitrag, den die Unternehmen der Energiewirtschaft an der Leistung der Gesamtwirtschaft erbrachten, quantifizieren, so stellt sich zunächst das Problem einer geeigneten, vergleichenden Bezugsgröße. Es läßt sich feststellen, daß die Energiewirtschaft der BRD im Jahre 1970 mit 1,9 % aller Beschäftigten und 8,2 % des Investitionsvolumens der Gesamtwirtschaft rund 6 % des Bruttoinlandsprodukts erzeugte /10/. Da jedoch verschiedene Energieträger angeboten werden, zudem noch unterschiedliche Heizwerte vorliegen und eine sehr differenzierte Markt- und Preisstruktur existiert, erscheint eine monetäre Bewertung der Leistung des Energiesektors wenig sinnvoll, wie in /11/ näher begründet wird. Der Beitrag der Energiewirtschaft für die Gesamtwirtschaft läßt sich jedoch indirekt erfassen, nämlich dann, wenn man dem wirtschaftlichen Wachstum die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs gegenüberstellt (Abb. 2).

ABB. 2:

Reales Bruttoinlandsprodukt, Primärenergieverbrauch und spezifischer Energieverbrauch in der BRD⁽¹⁾, nach /1/, /8/, /20/.

⁽¹⁾ 1950 bis 1960 ohne Saarland und Berlin, ab 1960 einschließlich Saarland und Berlin



Primärenergieverbrauch und Bruttoinlandsprodukt, als wichtigste das gesamtwirtschaftliche Wachstum kennzeichnende Größe, korrelieren sehr eng miteinander. Denn da das Bruttoinlandsprodukt (real und zu Marktpreisen) von der Entstehungsseite der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung her die Güter- und Dienstleistungsproduktion aller Wirtschaftsbereiche in Geldeinheiten bewertet, von der Verwendungsseite her den Wert der (befriedigten) Nachfrage aller Endverbraucher angibt, enthält es zunächst die wichtigsten ökonomischen Kenngrößen für sämtliche am Energieverbrauch beteiligten Sektoren.

In der BRD entwickelten sich Bruttoinlandsprodukt und Energieverbrauch in den vergangenen Jahren jedoch nicht immer exakt parallel zueinander. Das zeigt, daß neben ökonomischen auch andere wesentliche Größen für den Energieverbrauch bestimmend sind. So können z.B. strukturelle Änderungen, technischer Fortschritt, Temperatureffekte oder ein gewandeltes Verbraucherverhalten zu erheblichen Änderungen in der absoluten Höhe des Energieverbrauchs beitragen /12/ (siehe 1.2.1).

1.2 Die Entwicklung des Energiemarktes in der Vergangenheit

1.2.1 Die Energienachfrage

In der Aufbauphase der BRD nach dem zweiten Weltkrieg war zunächst ein stetiger Rückgang des Primärenergieverbrauchs je Einheit des Bruttoinlandsprodukts zu beobachten (Abb. 2). Diese Degression des spezifischen Primärenergieverbrauchs läßt sich vor allem auf die Fortschritte im Produktionsbereich während des Wiederaufbaus der Produktionskapazitäten und die damit erzielte bessere Energienutzung durch die Industrie (insbesondere die Grundstoffindustrie) /1/ sowie auf die stetigen Verbesserungen der Wirkungsgrade im Energiesektor selbst zurückführen /8/. Dagegen zeichnet sich seit etwa 1960 eine Stagnation bzw. eine geringe Zunahme in der Entwicklung des spezifischen Primärenergieverbrauchs ab. Diese Tendenzumkehr hat mehrere Gründe. Zum einen sind die Erfolge bei der Energieeinsparung im Produktionsbereich mit zunehmender Rationalisierung immer geringer geworden /13/, zum anderen hat der konsumtive Verbrauch expansiv zugenommen, insbesondere durch den vermehrten Bedarf für Raumheizwärme infolge der Vergrößerung des Wohnungsbestandes um mehr als 100 % zwi-

schen 1950 und 1970. Einer geringer werdenden Reduktion des spezifischen Energiebedarfs der Industrie stand damit eine etwa ebenso große Zunahme im Haushaltsbereich gegenüber.

Die strukturellen Änderungen im Energieverbrauch der einzelnen Gruppen Industrie, Haushalte und Kleinverbraucher sowie Verkehr sind in Abb. 3 wiedergegeben.

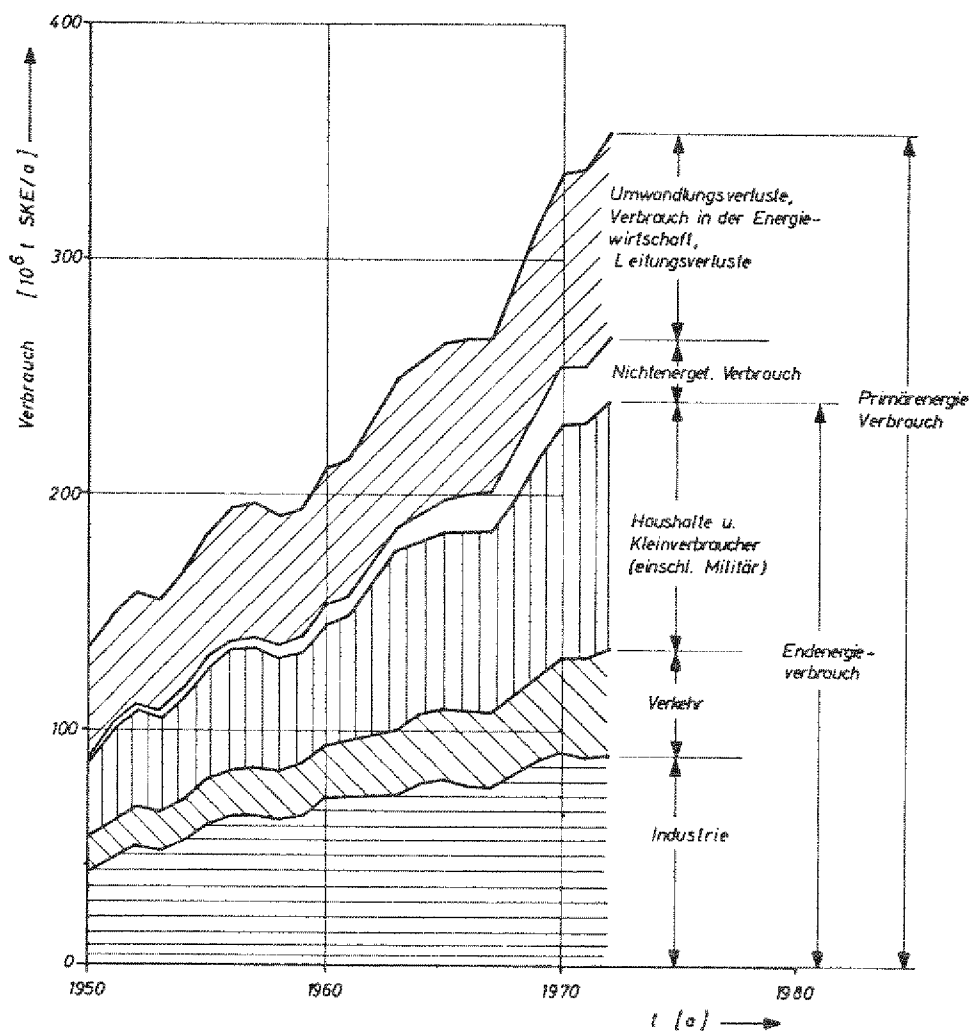


ABB. 3: Entwicklung des Energieverbrauchs nach Verbrauchssektoren

Eine genauere Information über die gewonnenen, umgewandelten und an die einzelnen Endverbraucher verteilten Energiemengen, die Umwandlungsverluste und die beteiligten Energieträger ist dem Energieflußbild - der graphischen Darstellung der in den Energiebilanzen /8/ ausgewiesenen Aufkommens- und Verwendungsbeträge - zu entnehmen (Abb. 4).

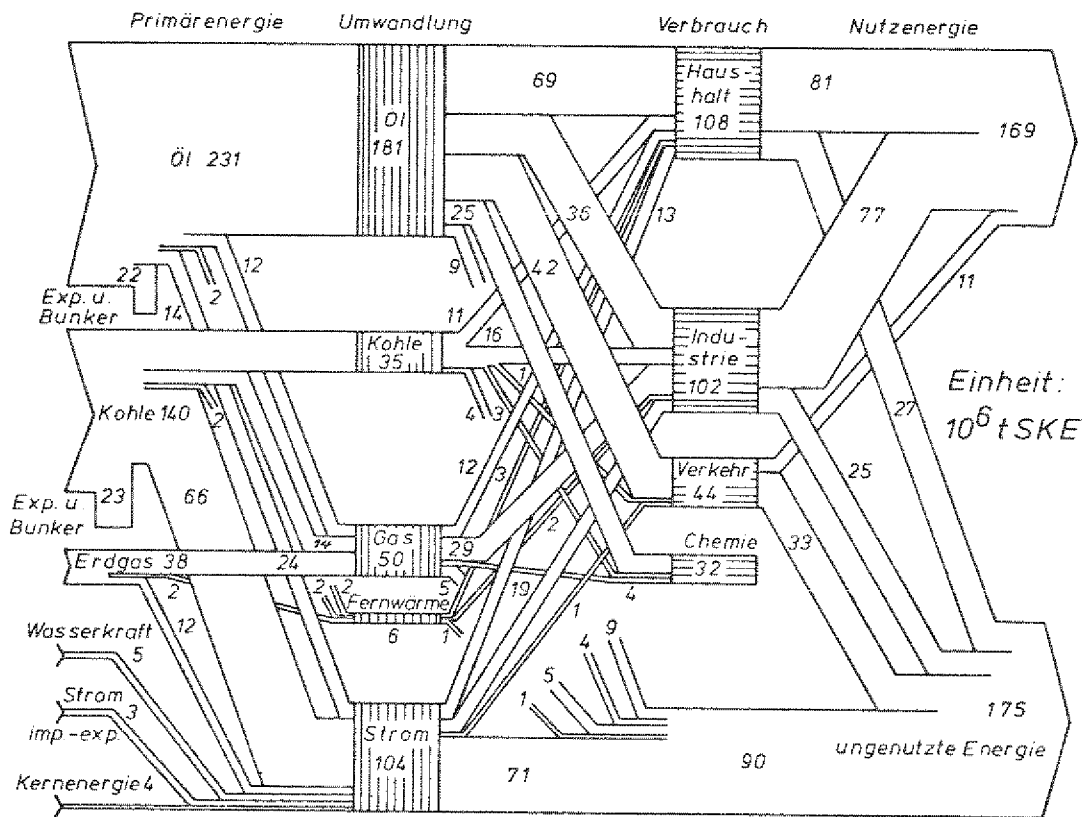


ABB. 4: Vereinfachtes Energieflußdiagramm der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1973, nach /36/

1.2.2 Das Energieangebot

Der Beitrag, den die einzelnen Bereiche der Energiewirtschaft zur Versorgung leisteten, hat sich zeitlich sehr unterschiedlich entwickelt. Betrachtet man den Primärenergiebereich, so lassen sich, wie Abb. 5 zeigt, drei Phasen nachweisen:

- 1950 bis 1957 Deckung des Energiebedarfs überwiegend durch inländische Kohle.
- 1958 bis 1969 Übergang von festen zu flüssigen Energieträgern.
- seit 1970 Verstärkter Einsatz von Erdgas und beginnende Nutzung der Kernenergie.

Aus Abb. 6 läßt sich für denselben Zeitraum die zunehmende Bedeutung der Sekundärenergien erkennen. Insbesondere im Kraftwerks- und Raffineriebereich lie-

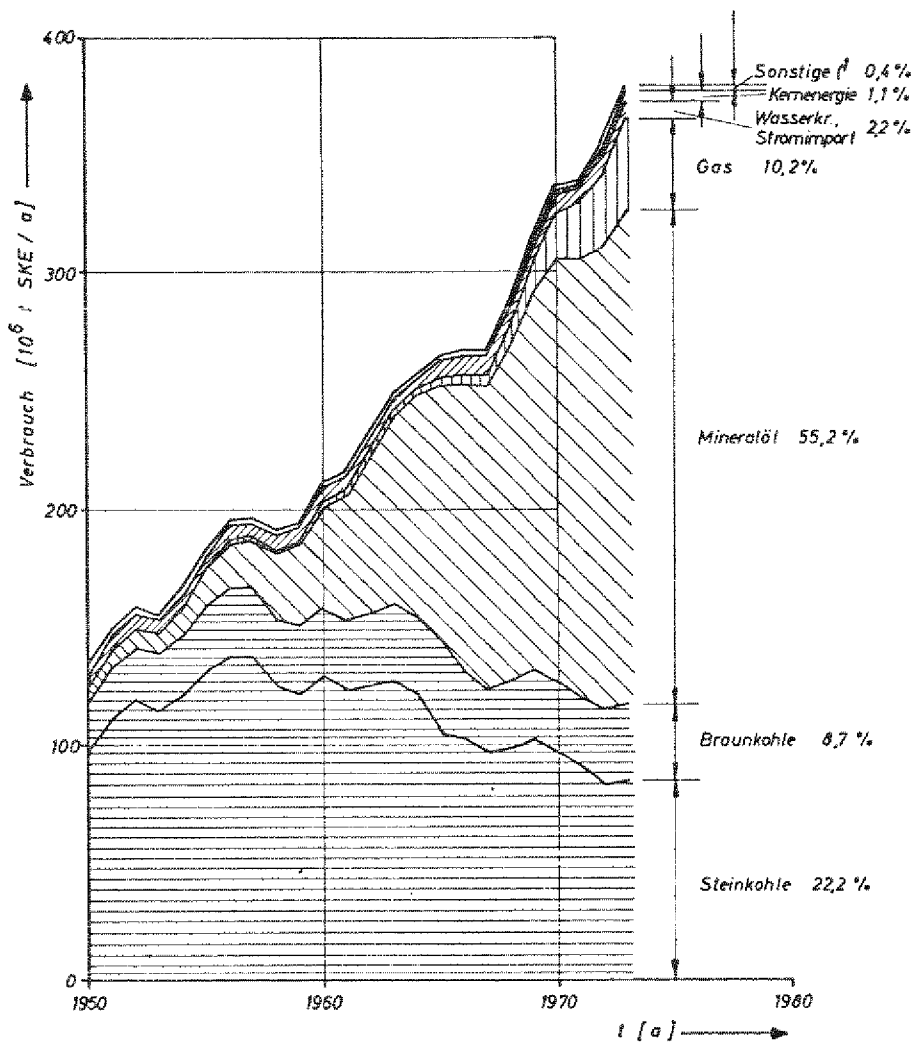


ABB. 5:

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern, nach /7/

¹⁾ Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm, Müll, Fernwärme u.a.

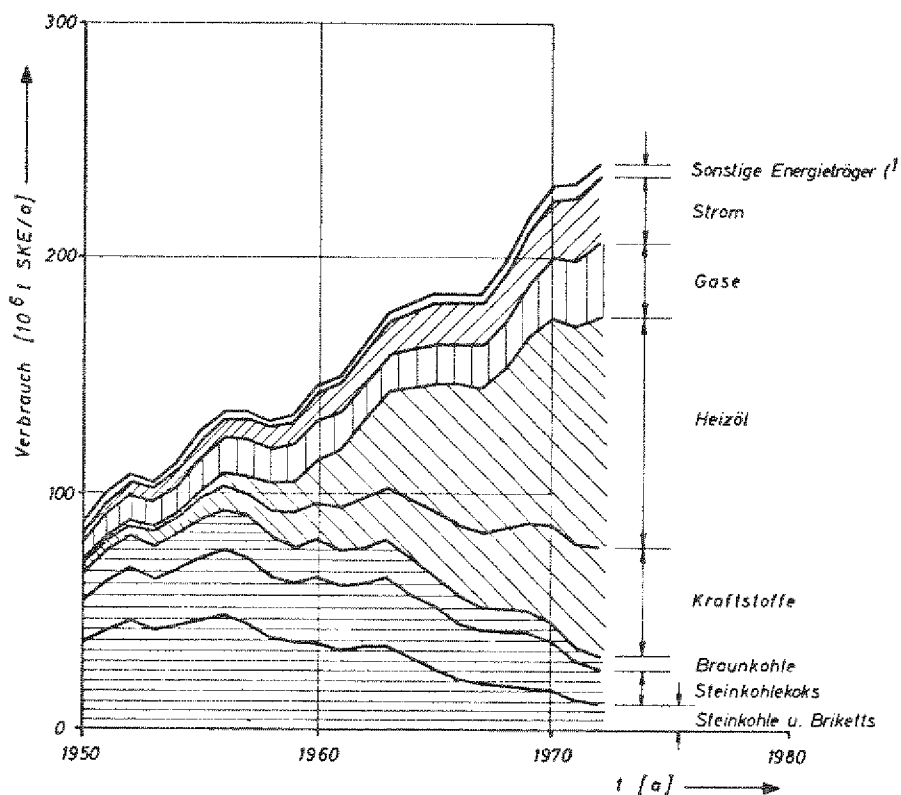


ABB. 6:

Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern, nach /7/

¹⁾ Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm, Müll, Fernwärme u.a.

gen daher die Zuwachsraten deutlich höher als in anderen an der Versorgung mit Endenergien beteiligten Gruppen.

Im internationalen Vergleich zeigt sich, daß die Veränderungen in der Energiewirtschaft der BRD tendenziell parallel zu Entwicklungen in der Weltenergiewirtschaft erfolgt sind /14/. Impulse, die auf quantitative oder qualitative Änderungen in der Energieversorgung der BRD abzielen, stehen nämlich wegen des hohen Anteils importierter Energie am Energieaufkommen in einem größeren internationalen Zusammenhang. Wie in allen rohstoffarmen Industrieländern mit großem Energieverbrauch ist daher die Entwicklung der nationalen Energiewirtschaften sehr stark durch die Situation auf dem Weltenergiemarkt geprägt. Begünstigt durch die Öffnung der Weltmärkte und den freien Transfer von Technologien zur Gewinnung, Umwandlung und Nutzung konnten in der Vergangenheit neue Energieträger rasch auf die expandierenden nationalen Energiemärkte eindringen. Dieser Mechanismus ist jedoch fragwürdig geworden, seitdem die mit der Energieversorgung verbundenen Probleme im internationalen Maßstab sichtbar geworden sind (siehe 1.1.1).

Inzwischen gehören die mit der Energiebedarfsdeckung gestellten Aufgaben ebenso wie die Probleme aus dem Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Umweltbereich zu den großen kritischen Weltfragen, von deren baldiger Lösung die Existenz und der Lebensstandard der Menschen im Jahre 2000 (mit einer vervielfachten Weltbevölkerung) ganz entscheidend abhängen werden /15, 16, 17/. Dabei gewinnt im zunehmenden Maße die Frage an Bedeutung, ob es gelibgt, die Beziehungen zwischen Industrie-, Rohstoff- und Entwicklungsländern so zu gestalten, daß eine gemeinsame Energieforschung betrieben, eine weltweite Suche nach neuen Energiequellen begonnen und ein freier Austausch der gewonnenen Energien gewährleistet werden kann.

1.3 Die energiewirtschaftliche Problematik

1.3.1 Die Grenzen der Energiebedarfsdeckung

Der Energieverbrauch der BRD hat - sieht man von konjunkturell bedingten Sonderentwicklungen ab - ständig zugenommen (Abb. 2). Mit fortschreitender wirtschaftlicher Expansion stößt die Deckung des wachsenden Energiebedarfs jedoch dort zunehmend auf Schwierigkeiten, wo natürliche Grenzen, hohe materielle Belastungen für die gesamte Volkswirtschaft oder irreparable Schädigungen der Ökosphäre auftreten.

Zu den äußeren Beschränkungen zählen:

- die begrenzte Verfügbarkeit an Ressourcen,
- das begrenzte Angebot an Kapital (d.h. an volkswirtschaftlichen Produktionsfaktoren),
- das begrenzte Umweltpotential.

Die Zielfunktion, eine hochindustrialisierte Volkswirtschaft

- ausreichend und sicher,
- kostengünstig,
- umwelt- und verbraucherfreundlich

mit Energie zu versorgen, ist daher durch diese drei Nebenbedingungen (in denen andere Restriktionen subsummiert sind) beschränkt.

Schematisch lassen sich die Interdependenzen zwischen Energieverbrauchern, Energieversorgern und den Restriktionsebenen wie folgt darstellen (Abb. 7).

In Abb. 7 sind die wesentlichen Wirkungsströme in sehr vereinfachter Form dargestellt, in Tab. 2 ist die kausale Verknüpfung der Größen in einem aggregierten Input-Output-Schema erfaßt. Dabei gibt ein beliebiges Element Y_x den Verzehr der Menge von Y an, der zur Erzeugung einer Einheit von X erforderlich ist. E_p repräsentiert also die für die Produktion verbrauchte Energiemenge, U_E die für die Energieerzeugung vernichtete Umwelt. Das Änderungsverhalten in diesem interdependenten System wird in entscheidender Weise durch die wechselseitige Verknüpfung von ökonomischen, ökologischen und energetischen Größen bestimmt. Gleichgewicht kann insgesamt nur erreicht werden, wenn sich die Gradienten aller Teilströme in einem bestimmten Maße relativ zueinander ändern. Die aktuelle Situation ist jedoch durch ein Ungleichgewicht gekennzeichnet,

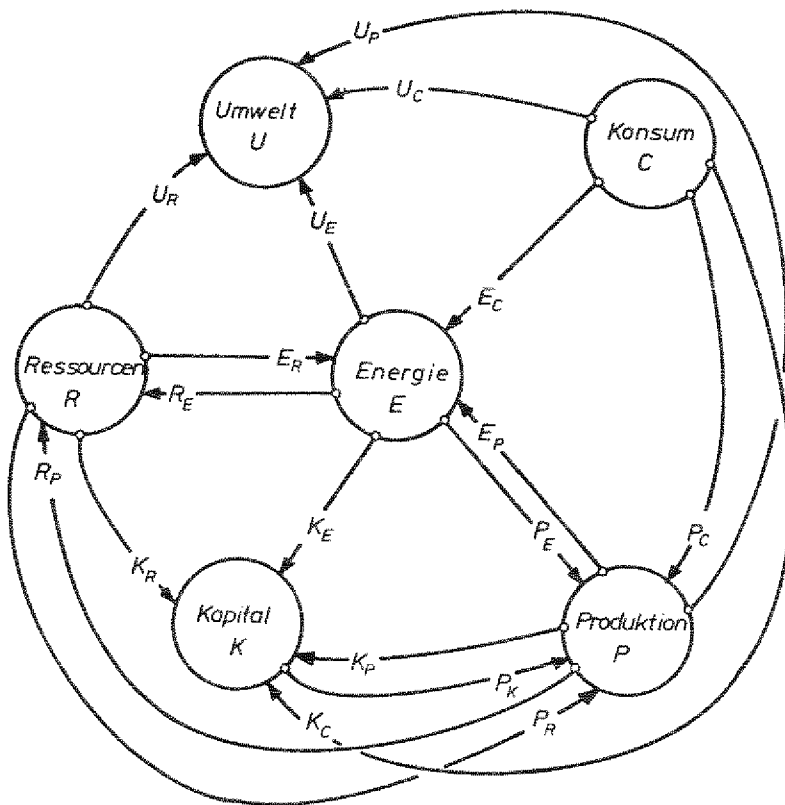


ABB. 7:

Interdependenzen zwischen Energieverbrauchern, Energieversorgern und Restriktionsgrößen.

dessen Ursache auf eine Reihe von divergierenden Teilveränderungen zurückzuführen ist. Die in diesem Zusammenhang stehenden besonderen Probleme werden im folgenden diskutiert.

1.3.2 Energiereserven und Versorgungssicherung

Die Energienachfrage kann nur zufriedenstellend gedeckt werden, wenn ein entsprechendes Energieangebot auf dem Markt existiert. Eine entscheidende Rolle für die Aufrechterhaltung der Energieversorgung spielt dabei das Potential an Energieressourcen sowie die Einschätzung der vorhandenen abbauwürdigen Energiereserven.

Obwohl Aussagen über in der Erde und in den Meeren vorhandene Vorräte mangels fundierter Prüfverfahren mit einem Unsicherheitsfaktor belastet sind, können von der Vorratsseite erhebliche Impulse auf die Angebots-situation und die Marktpreise ausgehen. Denn die Nachfrageelastizität in bezug auf die Preise ist bei den meisten Energieträgern (wie bei

Erzeugung Verzehr		Erzeugung					
		Ressourcen	Kapital	Umwelt	Produktion	Konsum	Energie
		R	K	U	P	C	E
Ressourcen	R				R_P		R_E
Kapital	K	K_R			K_P	K_C	K_E
Umwelt	U	U_R			U_P	U_C	U_E
Produktion	P	P_R	P_K			P_C	P_E
Konsum	C						
Energie	E	E_R			E_P	E_C	

TAB. 2: Input-Output-Schema mit aggregierten Grundgrößen

allen kurzfristig nicht-substituierbaren Rohstoffen) sehr klein. Eine grobe Abschätzung über die insgesamt auf der Erde vorhandene Menge an Energiereserven kann mit Hilfe der Clarke-Zahl erfolgen. Diese rein geologisch definierte Größe zeigt an, wie groß die Konzentration (in ppm) eines Elementes in den obersten Schichten (16 km) der Erdkruste ist. Da eine von den Kosten abhängige bestimmte Konzentration für eine wirtschaftliche Ausbeute erforderlich ist, sind die unter dem Gesichtspunkt der wirtschaftlichen Förderungswürdigkeit nutzbaren Energiereserven jedoch wesentlich geringer. Energievorräte werden daher nach den Kriterien der durch Prospektion ermittelten "verhältnismäßig gesicherten" (R_{ass} -reasonably assured resources) und den nach den gegenwärtigen geologischen Erfahrungen und Kenntnissen - jedoch ohne Berücksichtigung der mit der Erschließung verbundenen Kosten - berechneten "möglichen zusätzlichen" (R_{add} -estimated additional resources) sowie den "höchst möglichen" ($R = R_{\text{ass}} + R_{\text{add}}$) Reserven angegeben.

Eine auf den jüngsten verfügbaren Quellen beruhende Übersicht über die derzeitige Beurteilung der fossilen und nuklearen (Kernspaltungs-) und Energiereserven in der BRD und in der Welt geben die Tabellen 3, 4 und 5.

Energieträger	Einheit	Reserven			Quellen	Spez. Energie- äquivalent	Energie- äquivalent (tsKE)
		R_{ass}	R_{add}	R			
Steinkohle ⁽¹⁾	10^9 t	14	44	70 58	1,18,19 37	1 tsKE/t	$70 \cdot 10^9$ $58 \cdot 10^9$
Braunkohle ⁽²⁾	10^9 t			62 60	18 1, 19	0,291 tsKE/t	$18,0 \cdot 10^9$ $17,5 \cdot 10^9$
Erdöl	10^6 t	60 53	20 22,5	80 75,5 81 74	1 8 19 20	1,443 tsKE/t	$115,4 \cdot 10^6$ $109,0 \cdot 10^6$ $116,9 \cdot 10^6$ $106,8 \cdot 10^6$
Erdgas	10^9 Nm ³	259,7	90,3	350,0 337	8,20 19	1,100 tsKE / 10^3 Nm ³	$385 \cdot 10^6$ $370,7 \cdot 10^6$
Torf	10^6 t	800			19	0,43 tsKE/t	$344 \cdot 10^6$
Uran	10^3 t	1			8	$2,7675 \cdot 10^6$ tsKE/t ⁽⁴⁾	$2,7675 \cdot 10^9$
SUMME ⁽³⁾							$91,6 \cdot 10^9$

- (1) Sichere Vorräte bis zu einer Tiefe von 1200 m und einer Flözmächtigkeit nicht unter 30 cm.
 (2) Sichere Vorräte bis zu einer Tiefe von 500 m.
 (3) Addition der oberen Werte des Energieäquivalents.
 (4) Theoretisch verfügbare Energiemenge in tsKE je tU bei einer mittleren angenommenen Energiefreisetzung von 200 MeV pro Spaltungsreaktion.

TAB. 3: Fossile und nukleare Energiereserven der BRD.

Energieträger	Einheit	Reserven			Quellen	Spez. Energie- äquivalent	Energie- äquivalent (tSKE)
		R _{ass}	R _{add}	R			
Steinkohle ⁽¹⁾	10 ⁹ t	456	6258	6714	1,18	1 tSKE/t	6714·10 ⁹
Braunkohle ⁽²⁾	10 ⁹ t	192	1915	2107	18,24	0,271 tSKE/t	571·10 ⁹
Erdöl	10 ⁹ t	85,4			20	1,443 tSKE/t	123,2·10 ⁹
		90,3			8		130,3·10 ⁹
		90,0	410,0	500,0	21		751,5·10 ⁹
		82,0	397,0	480,0	22		692,6·10 ⁹
		85,3	684,7	770,0	28		1111,1·10 ⁹
Erdöl aus Ölsanden	10 ⁹ t	15	260	275	28	1,443 tSKE/t	396,8·10 ⁹
Erdöl aus Ölschiefer	10 ⁹ t	30	42000	42830	28	1,443 tSKE/t	61803,7·10 ⁹
Erdgas	10 ¹² Nm ³	60			20	1,100 tSKE/ 10 ³ Nm ³	66·10 ⁹
				332	22		365,2·10 ⁹
		75,9	225,1	301	28		331,1·10 ⁹
SUMME ⁽³⁾							70.961,8·10 ⁹

- (1) Bis zu einer Tiefe von 1200 m und einer Flözmächtigkeit nicht unter 30 cm.
 (2) Bis zu einer Tiefe von 500 m.
 (3) Addition der oberen Werte des Energieäquivalents.

TAB. 4:

Fossile Ener-
giereserven
der Welt

Energieträger	Reserven (10^3 t U bzw. 10^3 t Th) Preisbereich ⁽²⁾	R _{ass}	R _{add}	R	Quellen	Spez. Energie- Äquivalent	Energie- Äquivalent (10^9 tSKE)
Uran ⁽¹⁾	10 \$/lb U ₃ O ₈	865 866	911 916	1776 1782	23 25	$2,7675 \cdot 10^6$ tSKE/t U ⁽⁴⁾	4915,1 4931,7
	10-15 \$/lb U ₃ O ₈	670 680	627 632	1297 1312	23 25		3589,5 3631,0
	1000 \$/kg U (Erdkruste)			33000	26		91327,8
	1000 \$/kg U (Meerwasser)			40400			111807
	Gesamtvorräte ohne Preisber- ücksichtigung (Erdkruste)			10^9	27		$2,7675$ $\cdot 10^9$
	Gesamtvorräte ohne Preisber- ücksichtigung (Meerwasser)			10^6	27		$2,7675$ $\cdot 10^6$
	Thorium	10 \$/lb ThO ₂	208,9	928,1	1137		25
	80 \$/lb ThO ₂			2000	26	5684	
	1000 \$/kg Th			90000	26	255780	
SUMME ⁽³⁾							458914,8

TAB. 5:

Kernspaltungs-
energiereser-
ven der Welt

- (1) Nur Uranreserven der westlichen Welt (die Ostblockstaaten veröffentlichen keine Zahlen).
 (2) 1 \$ = 0,829 Sonderziehungsrechte (März 1973).
 1 lb = 0,453592 kg.
 (3) Addition der Werte des Preisbereiches 1000 \$/kg U bzw. 1000 \$/kg Th.
 (4) Theoretisch verfügbare ENergiemenge in tSKE je T U bei einer mittleren an-
 genommenen Energiefreisetzung von 200 MeV pro Spaltungsreaktion.
 (5) Theoretisch verfügbare ENergiemenge in tSKE je t Th bei einer mittleren
 angenommenen Energiefreisetzung von 200 MeV pro Spaltungsreaktion eines
 U-233-Kernes.

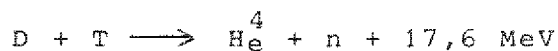
Energieträger	Einheit	R	Quellen	Spez. Energie- äquivalent	Energie- äquivalent (10^{15} tSKE)
Lithium	t Li	$2 \cdot 10^8$	26	$7,38 \cdot 10^6$ tSKE/ Li (1)	1,476
Deuterium	t D	$2 \cdot 10^9$	26	$1,7083 \cdot 10^7$ tSKE/t D (2)	34,166

- (1) Theoretisch verfügbare Energiemenge des Li-Brutmaterials (7,42 Atom-% Li-6, 92,58 Atom-% Li-7), bei einer Energiefreisetzung von 15,668 MeV pro Fusionsreaktion D+T (17,6 + 4,78 MeV aus Li-6, 17,6 - 24,7 MeV aus Li-7).
- (2) Theoretisch verfügbare Energiemenge des D bei einer D+D-Reaktionstechnologie und einem nach /26/ angenommenen Energieäquivalent von $5 \cdot 10^{14}$ J/kg D. Dabei wurde der D-Verbrauch einer eventuell vorausgehenden D+T-Reaktionstechnologie nicht berücksichtigt.

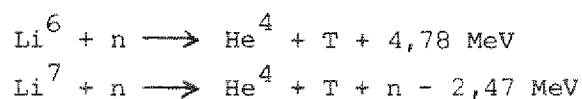
TAB. 6: Reserven der Kernfusionsenergieträger

Eine Aufstellung über die Energiereserven der Erde wäre unvollständig, würden nicht auch die Vorräte an Kernfusionsenergieträgern einer zu einem späteren Zeitpunkt möglichen Kernfusionstechnologie erfaßt (Tab. 6).

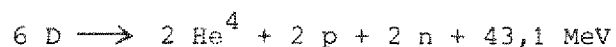
Bei Verfahren zur Fusion von Atomkernen sind grundsätzlich zwei Fusionsreaktionen vorstellbar, von denen die Deuterium-Tritium-Reaktion wohl als erste realisiert werden könnte:



Das dazu erforderliche Tritium könnte aus Lithium erbrütet werden, wobei das in der Natur vorkommende Lithium (7,42 Atom-% Li-6; 92,58 Atom-% Li-7) verwendet würde:



Die zweite Fusionsreaktion ist die Deuterium-Deuterium-Reaktion:



Neben den fossilen und nuklearen Energieträgern ist als dritte Gruppe die Zahl der regenerativen Energiequellen bzw. der nichtfossilen, nichtnuklearen Energieträger für die Beurteilung der Energieversorgungsmöglichkeiten mitentscheidend.

dend. Tabelle 7 gibt einen Überblick über das theoretische Potential, welches als oberster Grenzwert der errechneten physikalischen Energieangebote anzusehen ist.

Energieträger	Welt	Quelle	BRD	Quelle
Sonne	$90 \cdot 10^{12}$	(1)	$45 \cdot 10^9$	(1)
Geothermie	$15 \cdot 10^9$	(2, /39/)	-	-
Wind	$2 \cdot 10^{12}$	(3)	$1 \cdot 10^9$	(3)
Meereswärme	$65 \cdot 10^9$	(4)	-	-
Laufwasser				
Pumpspeicher	$4 \cdot 10^9 - 6 \cdot 10^9$	/42/	$5,5 \cdot 10^6 - 6,5 \cdot 10^6$	/42/
Gezeiten	$3 \cdot 10^9$	/43/		
Gletschereis	$100 \cdot 10^6 - 200 \cdot 10^6$	/44/		

- (1) Berechnet mit einer Solarkonstanten von 160 W/m^2 .
 (2) Bis zu einer Tiefe von 10 km.
 (3) Entspricht etwa 2,5 % der Sonnenenergie /40/.
 (4) Berechnet nach einer Angabe von /41/ mit einem Energieverbrauch von $11,2 \text{ tSKE/cap} \cdot \text{a}$ und einer Erdbevölkerung von $6 \cdot 10^6 \text{ cap}$.

TAB. 7: Potentiale der nichtnuklearen nichtfossilen Energieträger
in (t SKE/a)

Das größte Potential bietet die Sonnenenergie, doch nur, wenn es gelingt, Umwandlungstechnologien kostengünstig bereitzustellen, wäre eine großtechnische Anwendung denkbar, die einen nachhaltigen Einfluß auf die Struktur der Energieversorgung hätte. Bereits verfügbar ist jedoch die Technologie der solarthermischen Wandler, und hier ergäbe sich die Möglichkeit, in relativ kurzer Zeitspanne einen Anteil der fossilen Raumheizungswärme durch solare Wärme zu ersetzen, wie im folgenden begründet wird.

Geht man von einer im Weltall gemessenen Solarkonstanten von ca. $1,4 \text{ kW/m}^2$ aus, berücksichtigt, daß nur ein Viertel der gesamten Erdoberfläche im Mittel der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist und daß etwa 52 % der einfallenden Energie reflektiert oder absorbiert wird, so errechnet sich eine mittlere Energiedichte auf der Erdoberfläche von 168 W/m^2 . Würde man auf sämtlichen Dächern der Wohngebäude in der BRD ($22 \cdot 10^6$ Wohnungen 1972) solarthermische Wandler anbringen, so läßt sich ausrechnen, daß (bei einer mittleren Wohnungsfläche von $71 \text{ m}^2/\text{Wohnung}$ und bei einem Verhältnis Dachfläche/Wohnungsfläche von 2/5 sowie einem Wandlungswirkungsgrad von 80 %) durchschnittlich eine Energiemenge von etwa $50 \cdot 10^6 \text{ tSKE/a}$ in Form von Raumheizwärme dargeboten wird. Im Mittel würde dieses Energieangebot der insgesamt für die Raumheizwärme benötig-

ten Nutzenergiemenge entsprechen. Allerdings muß die zeitliche Differenz zwischen dem Moment des größten Energieangebots (Sommer) und dem der größten Raumheizwärmebedarfs (Winter) berücksichtigt werden. Zum Ausgleich der Zyklen sind daher Speicher- und Verbundsysteme mit anderen Energieträgern erforderlich. Abb. 8 veranschaulicht die prinzipielle Arbeitsweise bei der Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung.

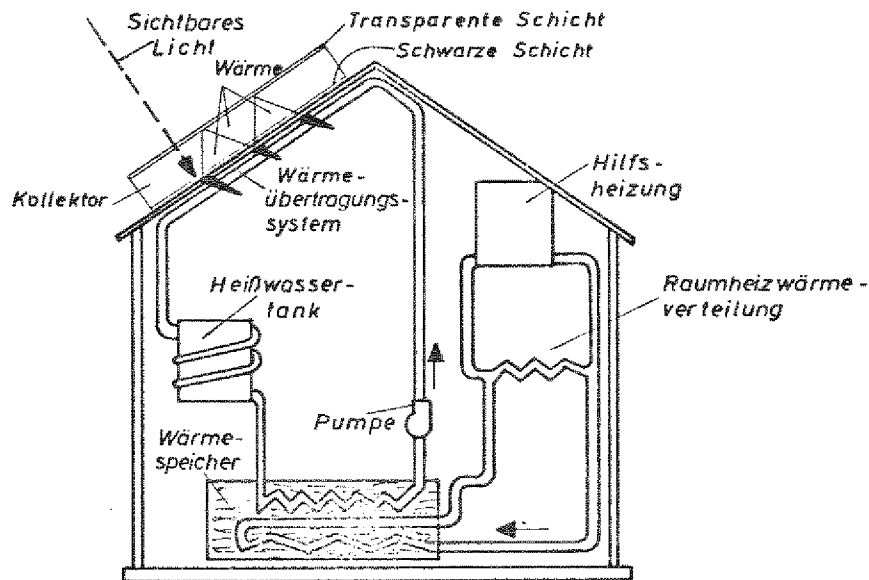


ABB. 8: Prinzipskizze, Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung, nach /110/

Naturgemäß sind die Angaben über die nuklearen Energieträger, insbesondere über Thorium, das erst durch den Brennstoffzyklus von Hochtemperaturreaktoren Bedeutung erlangt, sowie über die Kernfusionsenergieträger und die regenerativen Energiequellen unsicherer als die Zahlen für die fossilen Energieträger. Denn es gibt für sie noch keinen kommerziellen Markt, und daher wurde auch noch nicht ausreichend prospektiert bzw. anwendungsorientiert geforscht. Dennoch kann aus dem vorliegenden Zahlenmaterial eine Reihe von Schlüssen zur Beurteilung der Versorgungssituation gezogen werden.

Gemessen an den gesamten Energievorräten stellt sich der Weltenergieverbrauch von $7,1 \cdot 10^9$ tSKE im Jahr 1971 /8/ lediglich als Bruchteil der vorhandenen Ressourcen dar. Auch der für die nächsten Jahrzehnte vermutete Zuwachs des Weltenergieverbrauchs von im Mittel 4 % p.a. /28/ würde im Jahr 2000 nur zu einem

Energiebedarf von $22,1 \cdot 10^9$ tSKE führen, so daß der kumulierte Bedarf das gesamte Energiepotential der Erde kaum nennenswert verringern würde. Aus dieser Feststellung läßt sich schließen, daß die Frage der Versorgungssicherung generell kein Mengenproblem ist. Dagegen ergibt sich aus der unterschiedlichen quantitativen Konzentration der einzelnen Energieträger, der Verteilung der Lagerstätten über die Erde und den spezifischen geologisch gegebenen Abbaubedingungen sowie aufgrund der erforderlichen Umwandlungsverfahren ein enormes Struktur-, Verteilungs- und Kostenproblem.

Bei der derzeit bekannten Energiegewinnungs- und -wandlungstechnologie, welche die leicht und kostengünstig gewinnbaren fossilen Energieträger favorisiert, bedarf es nur noch weniger Jahre, bis die förderungswürdigen Lagerstätten von Erdöl und Erdgas - Energieträgern, deren Anteile an der Versorgung des Weltmarktes 1973 rund 71 % ausmachten /28/ - erschöpft sein werden. Diese Entwicklung wird in repräsentativer Weise durch die Situation beim Erdöl (Tab.8) veranschaulicht.

Jahr	Nachgewiesene Ölreserven ⁽¹⁾ (10^9 t)	Welt-Ölförderung (10^9 t)	Reichweite der Reserven ⁽²⁾ (Jahre)
1960	41,0	1.085	38
1961	42,2	1.119	38
1962	42,8	1.214	35
1963	45,1	1.302	35
1964	46,1	1.408	33
1965	47,6	1.547	31
1966	51,9	1.693	31
1967	56,4	1.813	31
1968	61,9	1.976	31
1969	72,0	2.131	34
1970	83,4	2.336	36
1971	85,2	2.468	35
1972	90,3	2.596	35
1973	85,3 ⁽³⁾	2.833	30

(1) Stand jeweils 31.12.

(2) Gemessen an der jeweiligen Jahresförderung.

(3) Rückgang trotz Neuerschließungen wegen korrigierter Angaben einiger Förderländer.

TAB. 8: Erdölreserven und Erdölförderung der Welt, nach /28/

Ein zweites Problem ergibt sich aus der politischen Komponente der Verteilung von Erdöl und Erdgas über die Welt (Abb. 9).

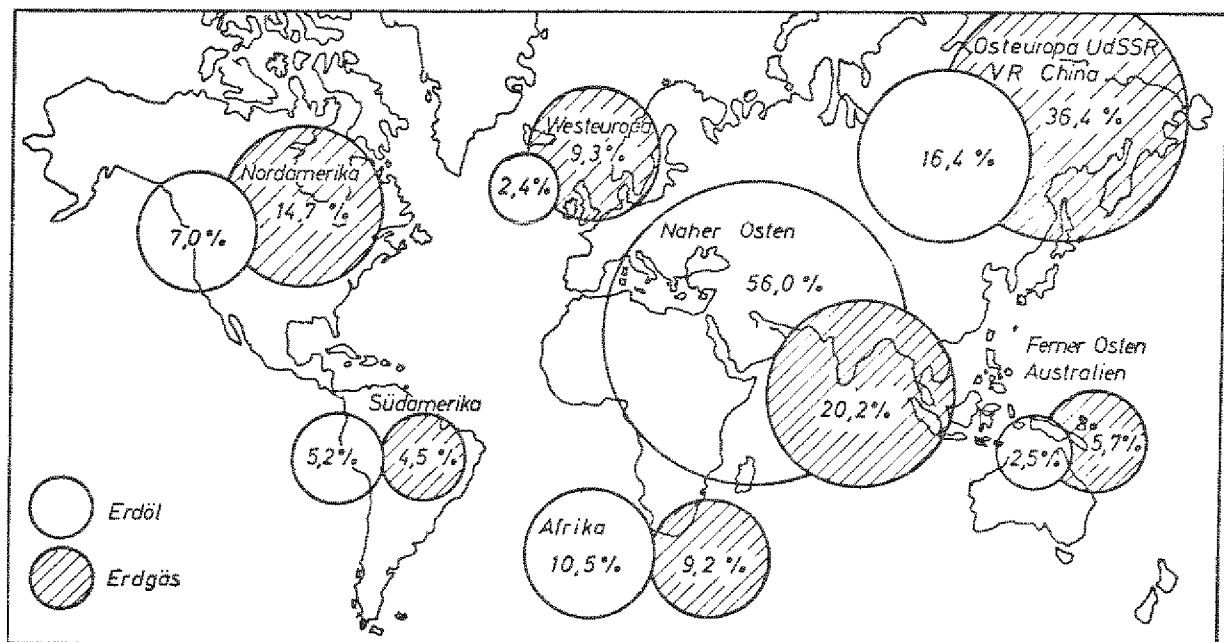


ABB. 9: Verteilung der Erdöl- und Erdgasvorkommen über die Welt, Stand 1973, nach /28/

Über 70 % der vorhandenen Erdöl- und 30 % der nachgewiesenen Erdgasreserven befinden sich in Regionen Afrikas, Asiens und Südamerikas, die zumindest heute als politisch instabil eingeschätzt werden. Die in diesen Ländern gewonnenen Energieträger sind damit dem Einflußbereich der Industrieländer weit-

Fördergebiet	API-Wichte (in Grad)	Listenpreis (in % je Barrel)			Staatliche Abschöpfungen		
		in % je Barrel			in %		
		Anfang Oktober 1973	Ab 18. Oktober 1973	Ab 1. Januar 1974	Anfang Oktober 1973	Ab 1. Januar 1974	Steigerung von Anfang Oktober 1973 bis 1. Januar 1974
Persischer Golf:							
Abu Dhabi	39	3,08	6,05	12,64	1,79	7,58	+ 324
	37	3,07	5,54	12,09	1,79	7,26	+ 306
	34	3,01	5,12	11,65	1,77	7,01	+ 296
Saudi-Arabien	31	2,88	4,90	11,56	1,71	6,98	+ 307
	27	2,73	4,63	11,44	1,60	6,69	+ 331
Kuwait	31	2,88	4,90	11,55	1,72	6,97	+ 306
Irak (ab Tripolis)	35	2,98	5,06	11,67	1,74	7,00	+ 303
Iran	31	2,94	4,99	11,64	1,72	6,98	+ 306
	40	3,14	5,83	12,41	1,82	7,45	+ 309
Katar	36	3,04	5,50	12,01	1,78	7,20	+ 305
Mittelmeer:							
Saudi-Arabien (ab Sidon)	34	4,21	7,15	13,65	-	-	-
Irak (ab Tripolis)	34	4,24	7,21	13,76	-	-	-
Libyen	40	4,60	8,93	15,77	2,57	9,33	+ 263
Algerien	44	4,80	9,25	16,22	2,41	9,32	+ 287
Andere Gebiete							
Indonesien	34	4,75	8,00	10,80	2,65	6,30	+ 138
Nigeria	34	4,29	8,31	14,69	2,41	8,69	+ 261
Venezuela	31	4,20	7,74	14,01	2,14	8,12	+ 280

+1) geschätzt

TAB. 9: Listenpreis für Erdöl (nach /29/)

gehend entzogen und unterliegen möglicherweise politisch motivierten Energieverteuerungen, wie das Beispiel der Ölpreiserhöhung im Winter 1973/74 gezeigt hat (Tabelle 9).

Auch die Produktion aus neu erschlossenen Fördergebieten in der westlichen Welt (Alaska, Kanadische Arktis, Golf von Mexiko, Nordsee) und die Ausbeute der sekundären Vorräte, Ölsande und Ölschiefer, oder die Verbesserung des Entölungsgrades können diese Situation nicht grundlegend ändern. Zwar würde sich das Erdöldefizit der westlichen Welt (Abb. 10) dadurch etwas mindern - eine optimistische Prognose /29/ räumt z.B. dem Nordseeöl für 1980 einen Deckungsanteil von rund einem Sechstel des Ölbedarfs der europäischen Länder ein (Abb.11), so daß sich die Importabhängigkeit der erweiterten europäischen Gemeinschaft von rund 60 % auf 50 % - 45 % senken ließe -, aber das Kostenproblem würde sich durch die höhere Selbstversorgung eher noch verschärfen. Denn Suche, Erschließung und Förderung von Erdöl und Erdgas aus diesen Randregionen der westlichen Hemisphäre ist mit unvergleichlich höheren Kosten verbunden als dies bei den traditionellen Fördergebieten Asiens, Afrikas oder Südamerikas der Fall ist.

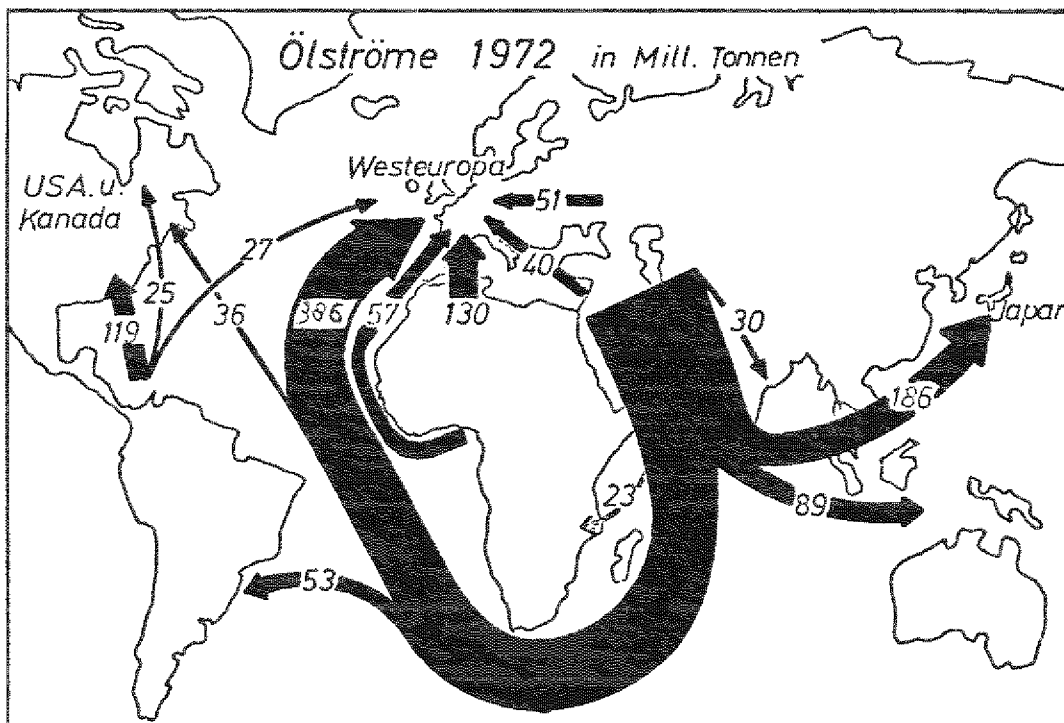


ABB. 10: Ölströme 1972 in 10^6 t

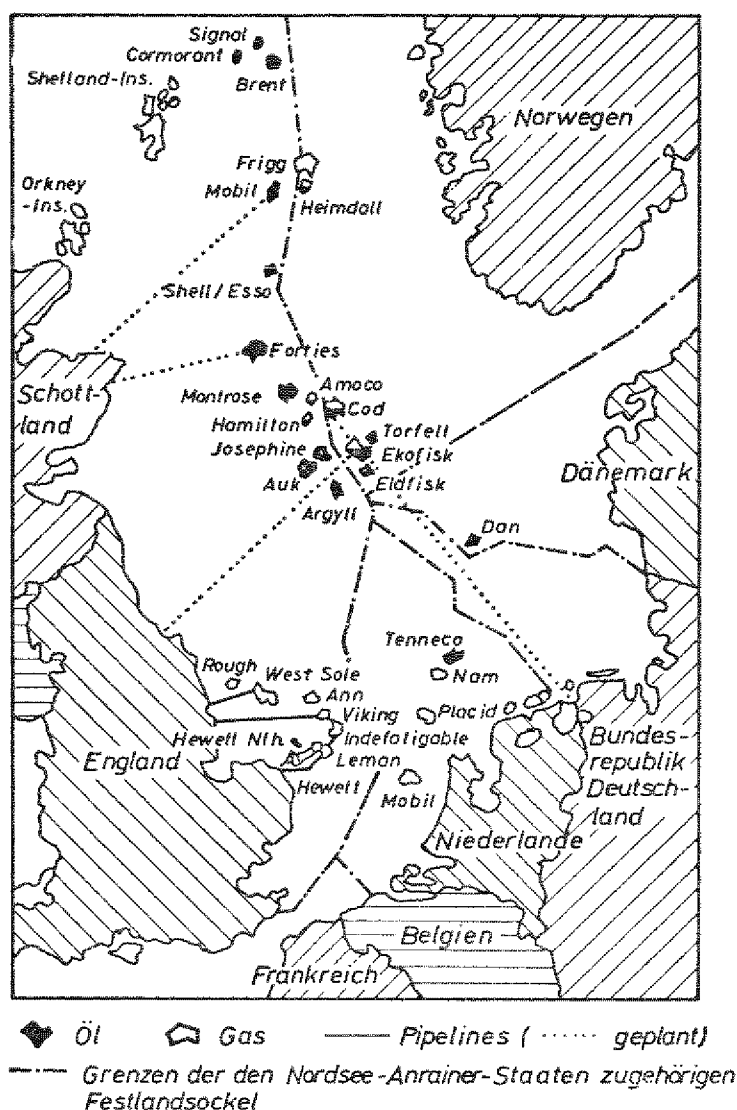


ABB. 11: Öl- und Gasfunde in der Nordsee, Stand 1973, nach /29/.

Der Aufwand für die Nutzbarmachung einer Tonne jährlicher Ölförderung aus westlichen Küstenmeeren ist z.B. fünf- bis zehnmal so hoch wie die gleiche Förderung in Saudi-Arabien /28/. Nach Angaben aus der gleichen Quelle belaufen sich die Kosten für eine 1500 m tiefe Bohrung in den USA an Land auf etwa 100.000 \$. Eine gleich tiefe Bohrung im Küstenschelf der USA kostet bereits 300.000 \$, während man in Alaska pro Bohrung bereits 1 Million \$ und mehr aufwenden muß. In der Nordsee betragen die Bohrkosten bereits 4 bis 10 Millionen DM, und für ein Ölfeld mit etwa 150 Millionen Tonnen Ölreserven in 200 km Entfernung von der Küste dürften sich die Gesamtinvestitionen für Prospektion, Erschließung, Ausbeutung und Transport auf rund 2 Milliarden DM belaufen.

Mit ähnlich schwierigen Abbaubedingungen und hohen Gewinnungskosten ist bei der Gewinnung von Öl aus Ölsanden zu rechnen. Erste Erfahrungen wurden bereits beim Abbau der Ölsände des Anhabaska-Gebietes, 400 bis 500 km nördlich von Edmonton in der Provinz Alberta, gewonnen. In diesem 30.000 km² großen Gebiet sollen nach Schätzungen /28/ rund 80 Milliarden Tonnen Öl enthalten sein, etwa ebensoviel wie die heute nachgewiesenen Erdölreserven der ganzen Welt ausmachen. Das darin enthaltene Gemisch aus Sand, Ton, Wasser und Öl wird in Spezialanlagen getrennt. Allerdings lagern nur ein Zehntel der Vorräte in der Nähe der Erdoberfläche bis in Tiefen von 35 m. Deshalb nimmt man an, daß sich bei den zur Zeit geltenden Kostenverhältnissen nur etwa die Hälfte des in den Ölsanden enthaltenen Öls gewinnen läßt. Die Chancen, das Preiskartell der Öl-oligopolländer durch eine höhere Selbstversorgungsquote der Industrieländer aufzubrechen und ein niedrigeres Preisniveau durchzusetzen, sind daher eher negativ zu beurteilen.

Anders als im Mineralölbereich, wo die Bundesrepublik über die international tätigen Mineralölunternehmen an ein weltweites Versorgungs- und -verteilungssystem angeschlossen ist, bestehen für die Erdgasversorgung der BRD einzeln vereinbarte Lieferverträge (Abb. 12).

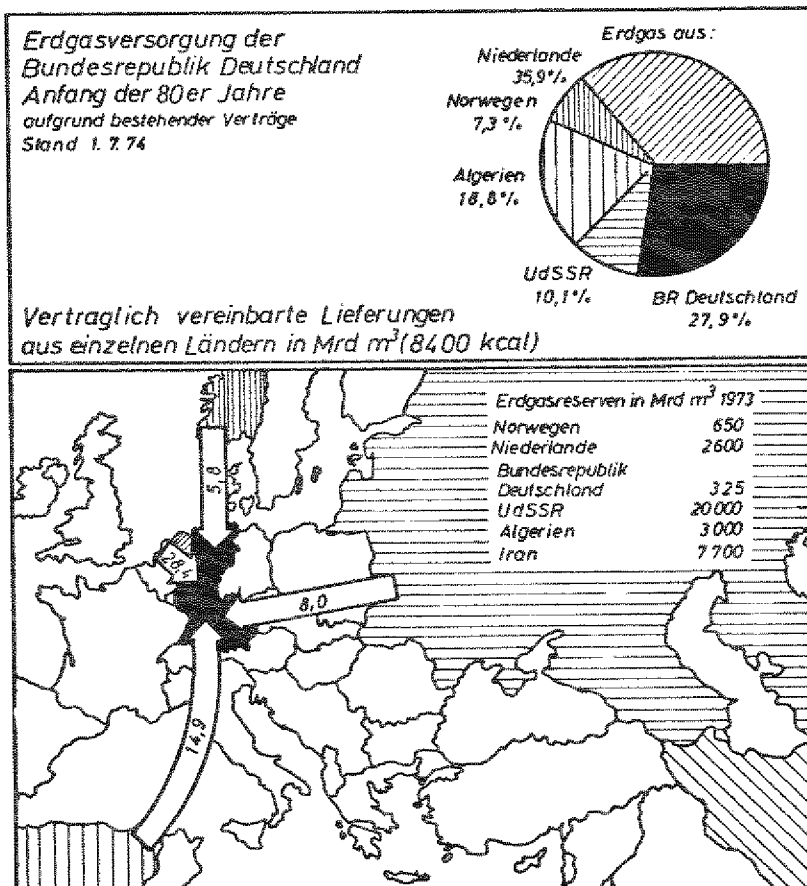


ABB. 12:

Erdgasversorgung der BRD und Erdgasreserven der Lieferländer, nach /30/

Die Situation der Gasversorgung in der BRD ist durch langfristig abgeschlossene Verträge, zum Teil durch Kombinationsgeschäfte (z.B. Rohrlieferungen, Industrieprojekte, Kredite) und Preisgleitvereinbarungen gekennzeichnet, Abmachungen, die kurzfristig mögliche Versorgungsprobleme wie beim Erdöl relativ unwahrscheinlich werden lassen: Zusätzlich importiertes Erdgas wird aus immer entfernteren Gebieten kommen müssen. Dabei wird der Transport durch Rohrleitungen ergänzt werden müssen durch den Transport mit Methan-Tankern, d.h. Erdgas aus überseeischen Gebieten wird für den Transport mit Schiffen verflüssigt werden müssen, wobei das Volumen auf 1/600 schrumpft. Dieses Verfahren gilt bereits für die Lieferungen aus Algerien. Die Technik des Flüssiggas-transportes ist bekannt und erprobt, jedoch wegen der Aufrechterhaltung einer Temperatur von -161°C aufwendig. Angesichts des insgesamt gestiegenen Energiepreiseniveaus ist der Flüssiggas-transport über große Entfernungen jedoch dennoch rentabel. Nur so ist es zu erklären, daß sich für das Erdgas Afrikas, des Mittleren Ostens und der Sowjetunion nicht nur Europäer, sondern auch Amerikaner und Japaner interessieren.

Angesichts wachsender Importabhängigkeit, zunehmender Versorgungsrisiken und steigender Preise auf dem Weltenergiemarkt kommt der Gewinnung inländischer Energieträger als einem Element der Sicherheit erhebliche Bedeutung zu. Auf der anderen Seite dürfte eine absolute Autarkie in der Energieversorgung der BRD nicht wünschenswert sein. Denn bei dem derzeitigen Verhältnis von Energieverbrauch zu inländischen Energiereserven müßte eine einseitig binnenwirtschaftlich orientierte Energiepolitik die Aufwendungen für Energie beträchtlich über das notwendige Maß hinaus erhöhen. Die Energiebedarfsdeckung würde dann die insgesamt vorhandenen Produktionsfaktoren stärker binden, als eine Energiewirtschaft mit freien Austauschmöglichkeiten. Daher würde eine absolute Versorgungsunabhängigkeit das Wirtschaftswachstum negativ beeinflussen. Im Sinne einer gesamtwirtschaftlichen Nutzenmaximierung ist also zwischen dem zumutbaren Risiko bei Importversorgung und der vertretbaren Belastung bei Selbstversorgung die Grenze zu ziehen (Abb. 13).

Unter den heimischen Energiequellen ist es insbesondere die Steinkohle, die mit ihren großen Reserven von 44 Mrd t (bis 1500 m Teufe) eine Funktion als Elastizitätspuffer in der Versorgung einnehmen kann. Die Steinkohle leistete 1973 als wichtigste heimische Energiequelle mit $84 \cdot 10^6$ t einen Beitrag von 22 % zur Primärenergieversorgung der BRD. Gleichzeitig war sie mit einem Anteil

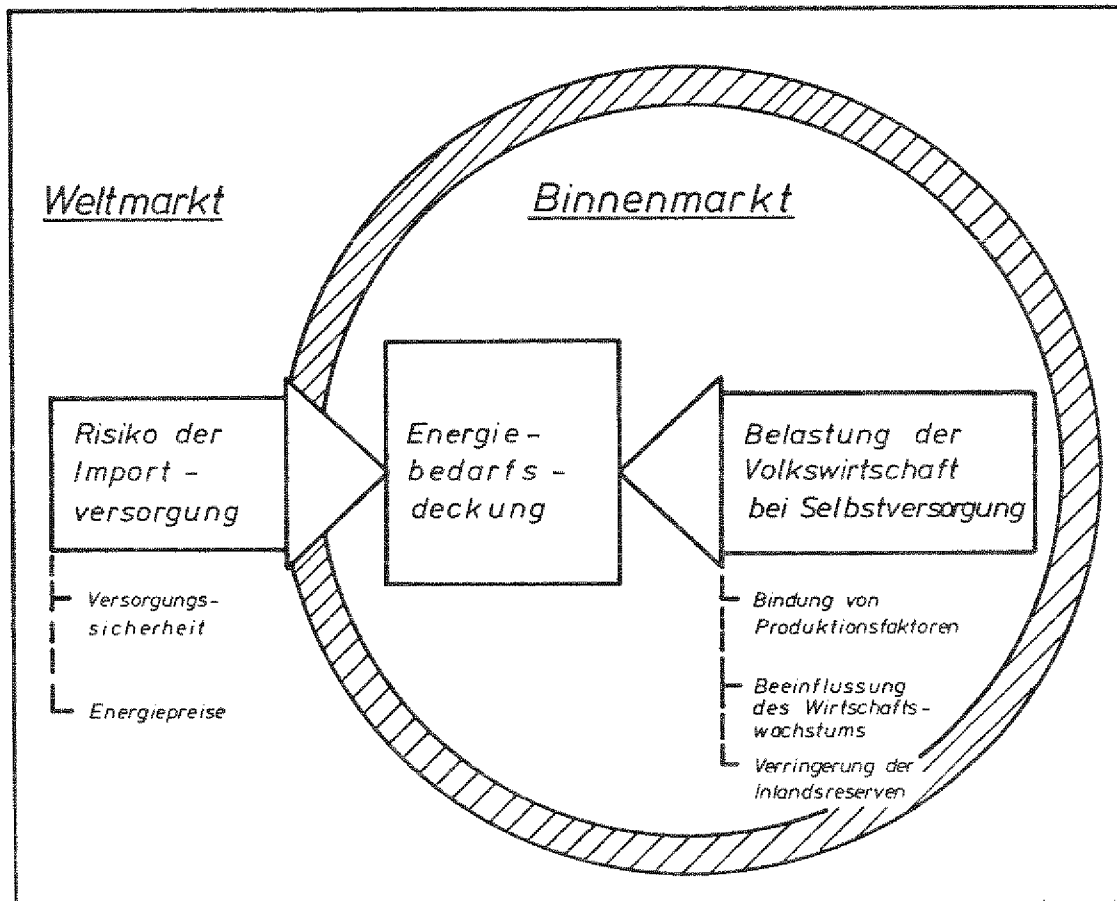


ABB. 13: Energiebedarfsdeckung durch Import- und Selbstversorgung

von 47 % an der installierten Engpaßleistung beteiligt und somit die Hauptstütze der Stromerzeugung /31/. Seit Jahren ist die deutsche Steinkohle jedoch einem starken Wettbewerbsdruck vor allem des leicht zu handhabenden und billigen Mineralöls und später des Erdgases ausgesetzt gewesen, was zu kontinuierlicher Förderanpassung zwang. Der weitaus größte Teil der heute geförderten Kohle wird in der Hüttenindustrie und in Kraftwerken eingesetzt. Dies ist vor allem eine Folge massiver Stabilisierungsbemühungen durch den Staat (Kokskohlenbeihilfe, Importbeschränkungen, Verstromungsgesetze, Heizölbesteuerung etc.). Doch trotz öffentlicher Hilfen zur Verbesserung der Wettbewerbssituation, finanzieller Abstützung auf den Bund und trotz hoher Leistungssteigerung durch Betriebskonzentration und technischen Fortschritt - sichtbar an der Leistung je Mann und Schicht unter Tage von 4015 kg im Jahre 1972 /32/ (Tab. 10, Abb. 14) - Produktionsbedingungen, die in Europa an der Spitze liegen - ist die deutsche Steinkohle bis zum Herbst 1973 der teuerste Energieträger in der BRD geworden.

Jahr	Förderung	Fördernde Anlagen	Abbaubetriebspunkte	Fördertägl. Förderung je Abbaubetriebspunkt	Vollmechanisierungsgrad in der Gewinnung	Leistung je Mann/Schicht unter Tage
	Mio t ¹⁾	Anzahl		t	v.H.	kg ¹⁾
1957	149,4	173	2265	212	16,9	1599
1958	148,8	163	2177	227	21,9	1651
1959	141,7	156	1962	260	26,3	1841
1960	142,3	146	1631	310	39,5	2057
1961	142,7	140	1438	354	49,7	2207
1962	141,1	128	1327	382	60,0	2372
1963	142,1	120	1208	421	67,2	2521
1964	142,2	115	1134	447	74,4	2614
1965	135,1	107	1045	466	78,0	2705
1966	126,0	95	901	520	81,5	2926
1967	112,0	81	744	591	84,0	3264
1968	112,0	72	624	676	87,6	3526
1969	111,6	69	533	778	90,3	3665
1970	111,3	69	476	868	91,8	3755
1971	110,8	67	453	914	92,5	3828
1972	102,5	59	401	987	94,2	4015

(1) verwertbare Förderung

TAB. 10: Betriebskonzentration und technischer Fortschritt im Steinkohlenbergbau der BRD (nach /32/).

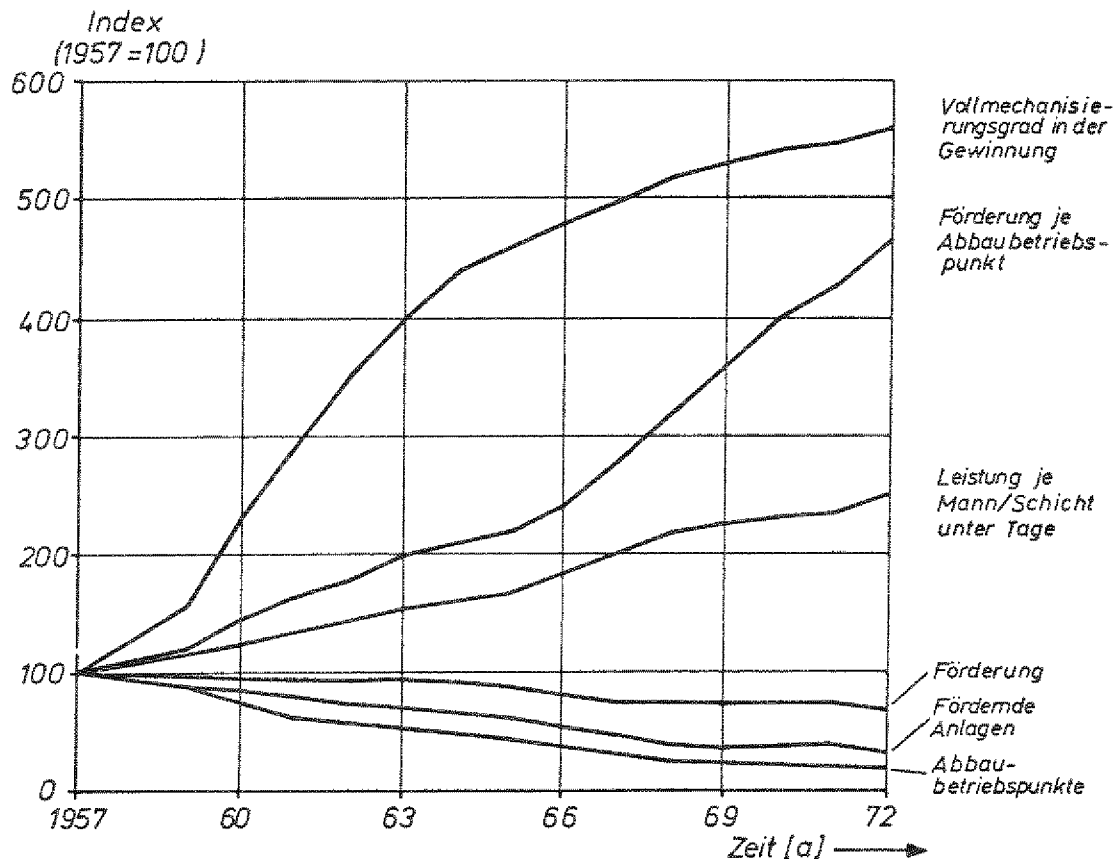


ABB. 14: Betriebskonzentration und technischer Fortschritt im Steinkohlenbergbau der BRD, nach /32/

Erst durch die veränderte Energiesituation haben sich die Konkurrenzbedingungen zwischen Heizöl und Steinkohle umgekehrt, so daß die Nachfrage nach Steinkohle schneller zunimmt als die Förderung und sogar der Kohleexport wieder Gewinne einbringt. Langfristig wird die Attraktivität der Steinkohle sicher in zunehmendem Maße auch durch die großtechnische Anwendung der Kohlevergasung und -verflüssigung bestimmt werden. (Auf die einzelnen Verfahren und ihren Entwicklungsstand wird im Zusammenhang mit der Vergasung von Braunkohle näher eingegangen.) Der Steinkohlenbergbau ist jedoch auf eine Förderung zugeschnitten, die nur mit erheblichen Investitionen und zusätzlichen Arbeitskräften langfristig gesteigert werden kann. Zunächst muß sogar noch mit einem weiteren Förderrückgang gerechnet werden, weil laufende Maßnahmen zur Konzentration auf die technisch und wirtschaftlich besten Zechen nicht unterbrochen werden können. Auf der anderen Seite ist man bemüht, die Risiken für den Steinkohlenbergbau dadurch zu mindern, daß man eine mittelfristig möglichst konstante Förderkapazität einhält ($94 \cdot 10^6$ t Förderung, davon $33 \cdot 10^6$ t Verstromung bis 1980 /33/).

Die sicheren und wahrscheinlichen deutschen Braunkohlevorräte werden heute mit $62 \cdot 10^9$ t /18/ angegeben, wovon $55 \cdot 10^9$ t entsprechend $16 \cdot 10^9$ tSKE auf die niederrheinische Bucht entfallen. Bei Anwendung der heutigen Abbautechnik können von dieser Menge etwa $3 \cdot 10^9$ tSKE als kostengünstig abbaubar angesehen werden /34/. Für ein grubennahes Kraftwerk stellt die Braunkohle derzeit den billigsten Energieträger dar, daher wird der überwiegende Teil der Förderung zur Verstromung eingesetzt (1973 82 %), und dieser Anteil wird mit dem Rückgang der Brikettproduktion noch steigen. Die Braunkohleförderung kann bis in die Mitte der 80-er Jahre noch auf etwa $38 \cdot 10^6$ tSKE ansteigen, anschließend dürfte sie jedoch abnehmen, falls kein neuer Aufschluß erfolgt /3/. Auf die Probleme, die mit der Erschließung des größten potentiellen Tagebaus, des Reviers Hambach, zusammenhängen, wird in /35/ hingewiesen. Der Energieträger Braunkohle spielt über die Verstromung hinaus jedoch möglicherweise eine bedeutende Rolle als Rohstoffträger für die Vergasung. Das aus der Braunkohle gewonnene umweltfreundliche Gas könnte in das bestehende Erdgasnetz eingespeist und in die Verbrauchszentren transportiert werden, um das importierte Erdgas nach und nach zu substituieren. Zwar ist die Technik der Vergasung auch für die Steinkohle entwickelt worden, jedoch ist die im Tagebau gewonnene Braunkohle vom Einsatz her kostengünstiger, so daß die Verfahren der Braunkohlevergasung wirtschaftlicher sind. Dabei lassen sich die Kohlevorräte durch den Einsatz von

Verfahren	Vergasungs- mittel	Entwicklungs- stand	Vergaserleistung	Verfahrensmerkmale
Lurgi	H_2O, O_2 (Luft) ²	Niederdruck Industriereif	35.000 Nm ³ /h	Festbett Produkt: Synthesegas, Ferngas Synthetisches Erdgas
		Größere Ein- heiten ge- plant.	75.000 Nm ³ /h	
Winkler	H_2O, O_2 (Luft)	Drucklos Industriereif	50.000 Nm ³ /h	Wirbelbett Produkt: Synthesegas
Koppers, Totzek	H_2O, O_2	Drucklos Industriereif Druckerhöhung geplant	60.000 Nm ³ /h	Flugstaub Produkt: Synthesegas
Hydrieren- de Verga- sung Rheinbraun Köln	H_2	Halbtechni- sche Anlage im Bau	100 kg C/h	Wirbelbett Einkoppelung nuklearer Prozeßwärme
		Kommerzielle Anlage ab Mitte der 80er Jahre	ca. 40 t C/h	Produkt: Synthetisches Gas, Reduktionsgas Synthesegas
Wasserdampf- vergasung Bergbau- Forschung	H_2O	Halbtechni- sche Anlage im Bau	100-200 kg C/h	Wirbelbett Einkopplung nuklearer Prozeßwärme
		Kommerzielle Anlage ab Mitte der 80er Jahre	ca. 40 t C/h	Produkt: Synthetisches Gas, Reduktionsgas Synthesegas
Synthane US Bureau of Mines Bi-Gas Bituminous Coal Research, Inc.	H_2O, O_2	Planung einer großtechni- schen Anlage Bau einer Versuchs- Anlage		Mehrstufige Fahrweise Produkt: Synthetisches Erdgas Mehrstufige Fahrweise Produkt: Synthetisches Erdgas
Hy-Gas Institute of Gas- technology	H_2O, O_2	Pilotanlage in Betrieb		Mehrstufige Fahrweise Produkt: Synthetisches Erdgas

TAB. 11: Verfahren der Kohlevergasung, nach /80/

Hochtemperaturreaktorwärme noch erheblich nutzbringender ausschöpfen als bei autothermer Vergasung, denn allein für die autotherme Wärmeerzeugung werden 40% - 45 % der eingesetzten Kohle verbraucht. Eine Übersicht über einige Verfahren der Kohlevergasung gibt dazu Tab. 11.

Die Situation auf dem Kernbrennstoffmarkt ist durch eine breite Streuung der Reserven über die ganze Welt gekennzeichnet. Allein von den als sicher und wahrscheinlich angesehenen Vorräten im Preisbereich bis 10 \$/lb U_3O_8 befinden sich fast 90 % in den USA, Kanada, Süd-Afrika und Australien. Der kumulierte Natururanbedarf bis zum Jahre 2000, wie er den neuesten Kernenergiebedarfs-schätzungen zu entnehmen ist, ist in Abb. 15 wiedergegeben.

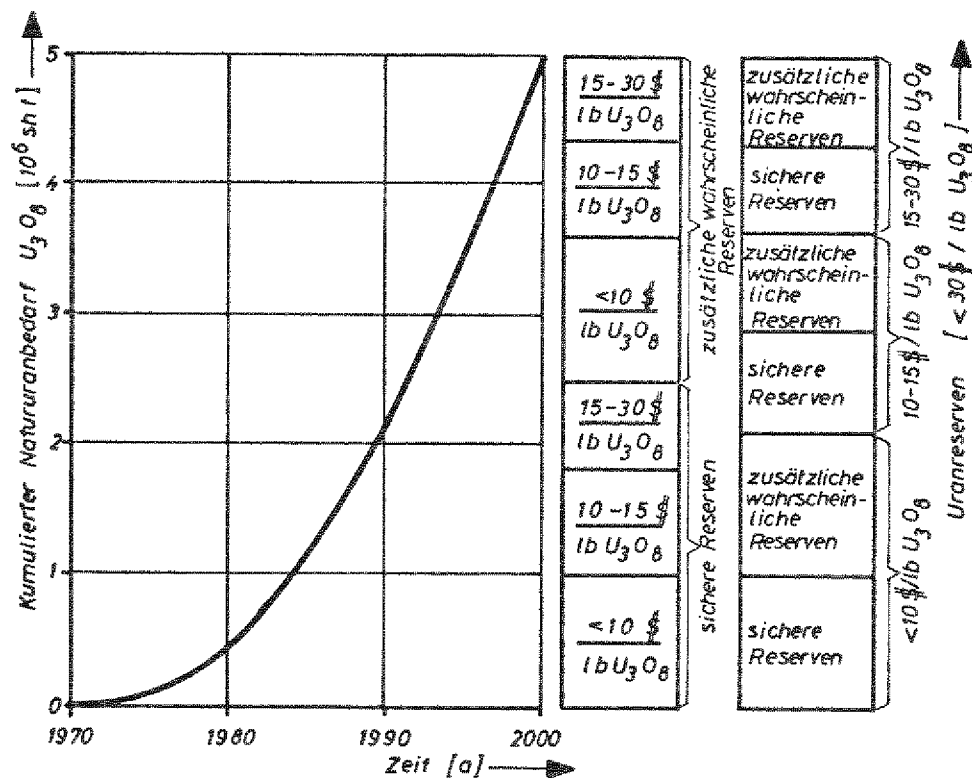


ABB. 15: Kumulierter Natururanbedarf und Uranreserven (< 30 \$/lb U_3O_8) der Westlichen Welt, nach /31/

Nach /31/ dürften die sicheren und wahrscheinlichen Reserven bis zu einer Preisbasis von 30 \$/lb U_3O_8 ausreichen, den gesamten Uranbedarf bis zum Ende des Jahrhunderts zu decken, falls man vom heutigen Kenntnisstand ausgeht. Allein die Tatsache, daß die sicheren Vorräte bis 10 \$/lb U_3O_8 in den letzten vier Jahren um etwa 50 % zugenommen haben, läßt erwarten, daß sich die Reserven

in den nächsten Jahren bei intensiver Prospektion noch wesentlich vergrößern werden. Zudem wird es möglich sein, durch den Einsatz von schnellen Brütern und Hochtemperaturreaktoren mit Brutfaktoren von 0,9 /68/ den Einsatz von Uran erheblich zu verringern, sowie die großen Thoriumvorräte im Brennstoffzyklus von Hochtemperaturreaktoren zu nutzen. Wegen der hohen Energiedichte und den daraus resultierenden günstigen Transport- und Lagerungsmöglichkeiten der Kernbrennstoffe sowie wegen der weltweiten Verteilung der Reserven über politisch relativ stabile Gebiete ist die Kernenergie unempfindlich gegenüber kurzfristigen Versorgungsengpässen /45/. Vom Standpunkt der Versorgungssicherheit ist sie daher anderen importierten Energiearten vorzuziehen. Unter diesem Gesichtspunkt hat die Kernenergie langfristig die Chance, sogar preisregulierend auf die fossilen Energieträger einwirken zu können.

1.3.3 Investitions- und Finanzierungsprobleme

Der Energiemarkt wird in zweierlei Hinsicht vom Kapitalmarkt beeinflusst:

- durch die Finanzierung der Investitionen für Anlagen der Energiewirtschaft,
- durch die Bereitstellung von Mitteln für die Energieausgaben der Verbraucher.

Zwischen den Investitionen der Energiewirtschaft und der Investitionsentwicklung in der Gesamtwirtschaft besteht ein enger Zusammenhang, da bei jedem Produktionsakt Energie eingesetzt werden muß. Die Höhe des energiewirtschaftlichen Investitionsaufwands wird einerseits durch den je Leistungseinheit der Volkswirtschaft erforderlichen Energieverbrauch, also den spezifischen Energiebedarf der Gesamtwirtschaft, zum anderen durch die Struktur der Energieerzeugung selbst bestimmt. Von großer Bedeutung sind dabei die Anteile, mit denen die einzelnen Energiebereiche an der Versorgung beteiligt sind, da sie eine sehr unterschiedliche Anlagenintensität haben. Außerdem wird das Investitionsvolumen der Energiewirtschaft in entscheidendem Maße durch außenwirtschaftliche Beziehungen geprägt. Je niedriger der Selbstversorgungsgrad ist bzw. je höher der Anteil der importierten Energie am Primärenergieaufkommen ist, desto weniger Produktionsfaktoren werden für die eigene Energieversorgung gebunden und desto geringer sind infolgedessen die Investitionsausgaben.

Verfolgt man die Investitionen der Energiewirtschaft in ihrer Entwicklung, so läßt sich nachweisen, daß sie zwar volumenmäßig stark zugenommen haben (von

$1,8 \cdot 10^9$ DM 1950 auf $10,6 \cdot 10^9$ DM 1971, in jeweiligen Preisen gerechnet /38/) daß jedoch ihr Anteil an den gesamtwirtschaftlichen Investitionen nahezu kontinuierlich abgesunken ist (von 9,5 % 1950 auf 5,2 % 1971). Die geringere Wachstumsgeschwindigkeit der Energieinvestitionen ist zum einen eine Folge des sinkenden spezifischen Energiebedarfs bei gleichzeitig überproportional steigendem Investitionsvolumen der Gesamtwirtschaft, vor allem des Dienstleistungs- und des Wohnungsbausektors /59/. Andererseits macht sich hier in verstärktem Maße bemerkbar, daß die Primärenergieversorgung der BRD sehr stark importorientiert ist (derzeit werden 68 % des Primärenergieverbrauchs durch Einfuhren gedeckt). Der weitaus größte Teil der Energieinvestitionen entfällt auf den Elektrizitätsbereich (derzeit etwa 62 %), wobei insgesamt wiederum ungefähr die Hälfte der Investitionsausgaben bei Fortleitungs- und Verteilungsanlagen entstehen (Tab. 12).

	Investitionen in 10^9 DM									
	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973 ^{a)}	1974 ^{b)}
Erzeugungsanlagen	1230	1110	830	728	874	1390	2290	3290	3470	4710
Fortleitungs- und Verteilungsanlagen	2135	2100	2230	2144	2316	2820	3390	3780	3800	4350
Sonstiges	545	580	520	518	550	610	740	750	890	860
Gesamte Öffentliche Elektrizitätsversorgung	3910	3790	3580	3390	3740	4720	6420	7820	8160	9920
	Veränderungen gegenüber dem Vorjahr in %									
Erzeugungsanlagen	+ 3	- 10	- 25	- 13	+ 20	+ 59	+ 65	+ 44	+ 6	+ 36
Fortleitungs- und Verteilungsanlagen	+ 2	- 2	+ 4	- 4	+ 8	+ 22	+ 20	+ 12	+ 1	+ 14
Sonstiges	+ 11	+ 6	- 10	+ 0	+ 6	+ 11	+ 21	+ 1	+ 19	+ 1
Gesamte Öffentliche Elektrizitätsversorgung	+ 3	- 3	- 6	- 5	+ 10	+ 29	+ 33	+ 22	+ 4	+ 22

a) Revidiert, b) geschätzt

TAB. 12: Entwicklung der Investitionen in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung, nach /46/.

Nach /46/ wird der Investitionsaufwand in diesem Bereich trotz des erwarteten verminderten Zuwachses der Stromabgabe in den nächsten Jahren erheblich ansteigen. Den kumulierten Ausgaben von $53 \cdot 10^9$ DM der Jahre 1960 - 1972 werden schätzungsweise $170 \cdot 10^9$ bis $200 \cdot 10^9$ DM an Investitionsaufwendungen in den Jahren 1973 bis 1985 gegenüberstehen. Diese Steigerung ist allerdings zum Teil inflationsbedingt. Nach Tab. 13 dürften sich die Gesamtinvestitionen für die Energiewirtschaft (ohne Ersatzinvestitionen) bis 1985 um rund $270 \cdot 10^9$ DM bewegen.

Energieträger	Investitionsobjekt	Investitionsvolumen
Erdöl	Raffineriebauten	6 - 7
	Tanker	5
	Lagerkapazitäten, Pipelines, Vertrieb	20
	Rohölförderung im Ausland	35
Erdgas Elektrizität (ohne Ersatz- investitionen)	Verteilung	27
	Kraftwerke und Leitungsnetz	144,3
	Ersatzkerne und Nachladungen	18,7
	Uranprospektion	3,0
	Urananreicherung	2,0
Braunkohle	Erschließung des Tagebaus Hambach	4,0
Steinkohle	Bergbaubetriebe Kokereien, Brikettfabr.	4,8
SUMME		270,8

TAB. 13: Geschätzte Gesamtinvestitionen der Energiewirtschaft
bis 1985 in 10^9 DM, nach /47/ und /48/.

Angesichts dieser Tendenzen und Dimensionen läßt sich absehen, welche Probleme eine weitere Steigerung des Selbstversorgungsgrades in der Energieversorgung für die Kapitalmärkte mit sich bringt, vor allem, da eine weitere Verschiebung in der prozentualen Zusammensetzung der Energieträger einen zusätzlichen Investitionsbedarf auslösen würde. Die Bereitstellung erhöhter finanzieller Mittel für die Energieinvestitionen kann daher nicht ohne erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft und den sozialen Bereich der BRD bleiben.

Dem Problemkreis der Finanzierung von Energieinvestitionen im Inland steht auf der anderen Seite das Problem der Aufbringung von Mitteln für die Einfuhr von Energie aus dem Ausland gegenüber.

Aus Abb. 16 geht hervor, daß die Energieeinfuhren der BRD seit 1960 etwa in demselben Maße zugenommen haben wie der Primärenergieverbrauch gewachsen ist, während die Ausfuhren mit $40 \cdot 10^6$ bis $45 \cdot 10^6$ tSKE/a nahezu unverändert blieben. Demzufolge hat sich der Einfuhrüberschuß seit 1960 von $0,8 \cdot 10^9$ DM/a auf $13,1 \cdot 10^9$ DM/a im Jahre 1973 in etwa versechzehnfacht. In der gleichen Zeit hat sich die

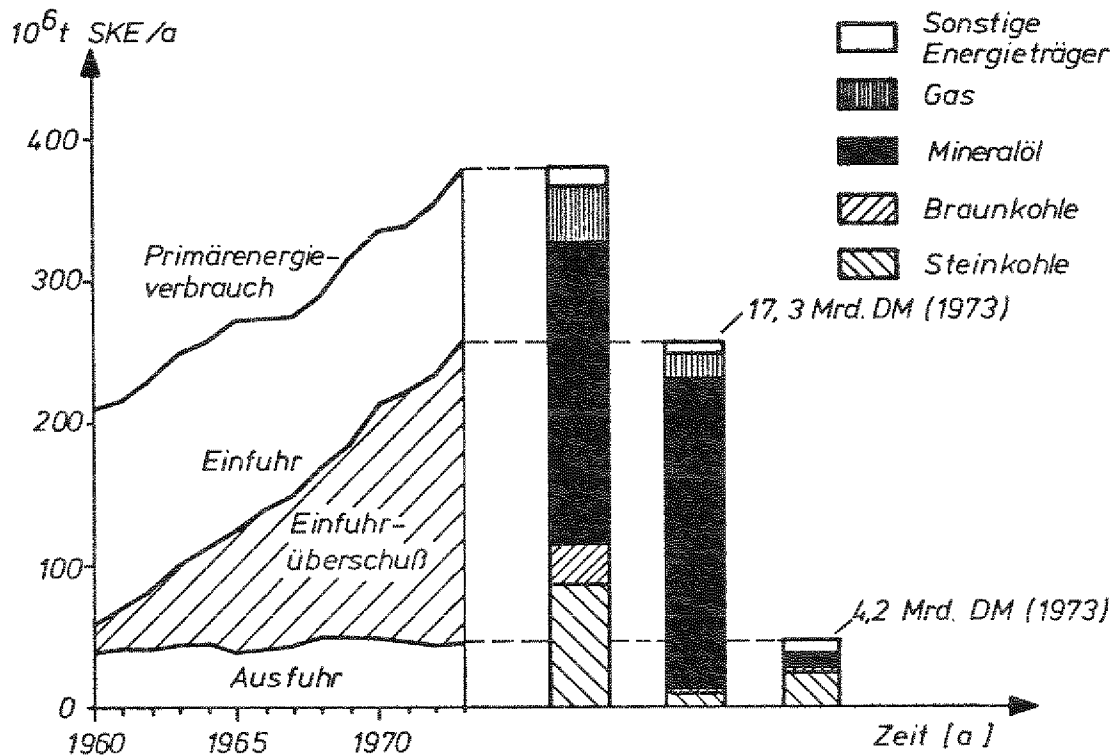


ABB. 16: Einfuhrüberschuß der BRD, nach /8/

Bundesrepublik zu einem der größten Welthandelspartner entwickelt und bei hohen Aktivsaldoen in der Handelsbilanz (in der der Warenverkehr mit dem Ausland nachgewiesen wird) ständig Überschuß-Ungleichgewichte in der Zahlungsbilanz erwirtschaftet (Tab. 14). Die Finanzierung der Energieimporte über die freien Kapitalmärkte stellte daher kein besonderes Problem dar, da - wie die großen Devisenreserven zeigen - ausreichend Kapital zufließt. Diese Situation hat sich durch die sprunghafte Verteuerung der Energieimporte, vor allem des Rohöls (Tab. 9) verändert. Aus Abb. 17 ist zu entnehmen, daß für 1974 schätzungsweise allein für Rohölimporte $14 \cdot 10^9$ DM (bei einem Importanteil von 94 %, Abb. 18) zusätzlich aufzuwenden sein werden.

Hätte die BRD 1974 die gleiche außenwirtschaftliche Entwicklung wie im letzten Jahr, dann würde sich der vorjährige Überschuß in der Leistungsbilanz

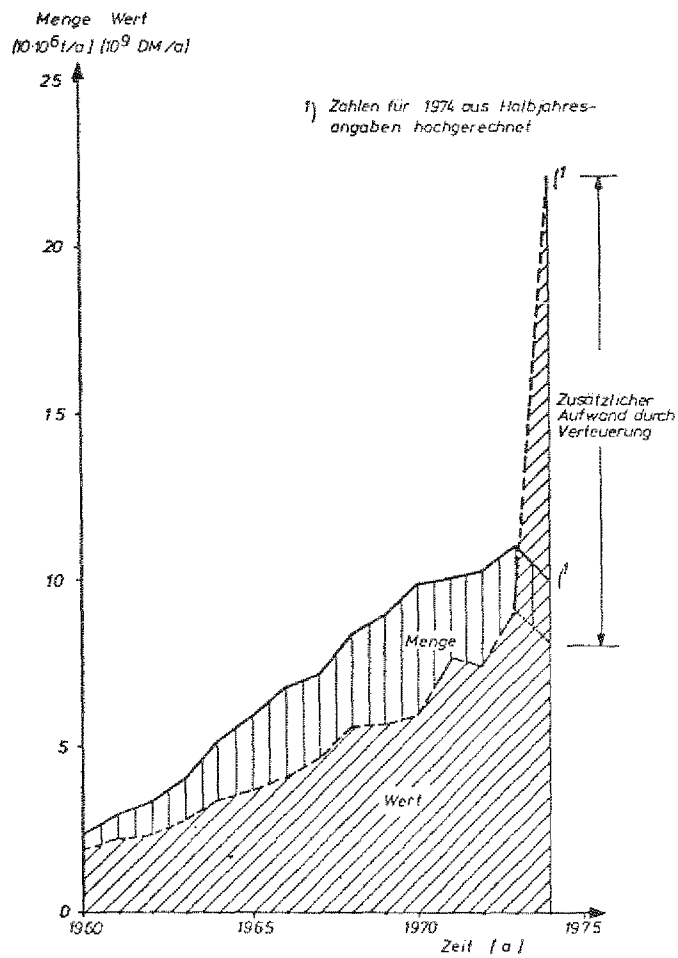


ABB. 17:

Mengen und Werte der Rohöleinfuhren in die BRD, nach /8/

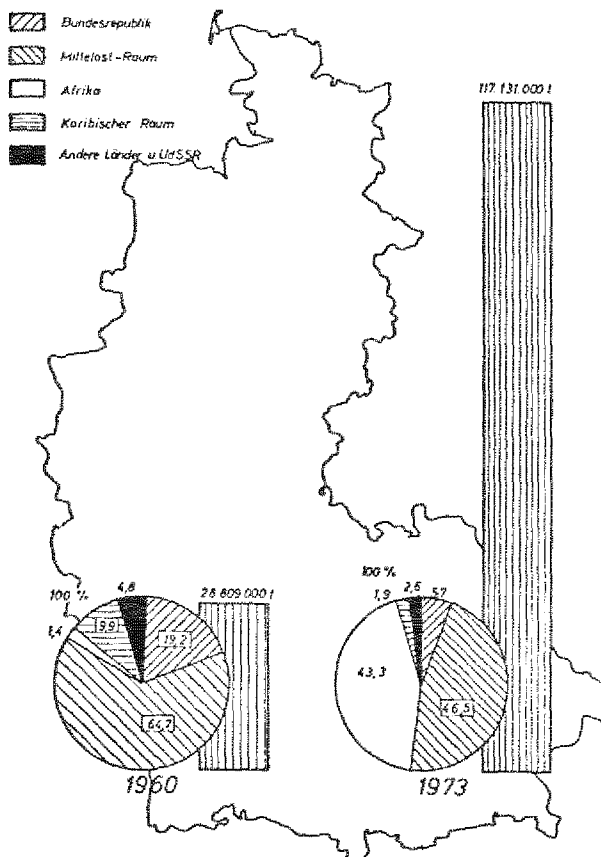


ABB. 18:

Rohölversorgung der BRD
 1960 und 1973, nach /20/

Position	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
I. Leistungsbilanz (Bilanz der laufenden Posten)								
1. Warenhandel								
Ausfuhr (fob)	80 557	86 950	99 445	113 288	124 932	135 620	148 660	177 985
Einfuhr (fob)	68 932	66 303	76 807	93 063	103 627	103 627	113 258	138 677
Transithandel (Saldo)	+ 200	+ 362	+ 65	- 94	- 83	+ 932	+ 873	+ 1 009
Saldo des Warenhandels	+ 11 825	+ 21 009	+ 22 703	+ 20 319	+ 21 222	+ 23 294	+ 26 538	+ 40 317
2. Dienstleistungsverkehr	- 5 042	- 4 581	- 3 535	- 4 071	- 7 878	- 8 682	- 9 153	- 11 836
3. Übertragungen	- 6 295	- 6 422	- 7 312	- 8 750	- 9 759	- 11 497	- 14 037	- 16 074
Saldo der Leistungsbilanz (1 + 2 + 3)	+ 488	+ 10 006	+ 11 856	+ 7 498	+ 3 585	+ 3 116	+ 3 349	+ 12 407
II. Kapitalverkehr (Mittel- abfluß: -)								
1. Langfristiger Kapital- verkehr								
Privater langfristiger Kapitalverkehr	+ 2 189	- 1 440	- 9 872	- 21 203	+ 1 527	+ 8 680	+ 16 297	+ 10 235
Öffentlicher langfri- stiger Kapitalverkehr	- 2 531	- 1 490	- 1 329	- 1 817	- 2 461	- 2 387	- 1 457	- 2 144
Saldo des gesamten lang- fristigen Kapitalverkehrs	- 342	- 2 930	- 11 201	- 23 040	- 934	+ 6 293	+ 14 840	+ 8 090
2. Kurzfristiger Kapital- verkehr								
Kreditinstitute	- 574	- 4 823	+ 2 455	+ 4 325	+ 7 927	+ 1 174	- 420	- 5 149
Wirtschaftsunternehmen	- 20	- 3 734	+ 1 436	+ 65	+ 8 454	+ 2 017	+ 3 561	+ 8 679
Öffentliche Hand	+ 337	- 361	+ 1 185	- 29	- 428	+ 1 038	+ 327	- 140
Saldo des kurzfristigen Kapitalverkehrs	- 257	- 8 918	+ 5 076	+ 4 361	+ 15 953	+ 4 229	- 3 654	+ 3 390
Saldo des gesamten statis- tisch erfaßten Kapital- verkehrs	- 559	- 11 848	- 6 125	- 18 679	+ 15 019	+ 10 522	+ 11 186	+ 11 480
III. Saldo aller statistisch erfaßten Transaktionen (I + II)	- 111	- 1 842	+ 5 731	- 11 181	+ 18 604	+ 13 638	+ 14 535	+ 23 887
IV. Saldo der statistisch nicht aufgegliederten Transaktionen (Restposten)	+ 2 063	+ 1 702	+ 1 278	+ 919	+ 3 308	+ 2 720	+ 1 155	+ 2 541
V. Saldo aller Transaktionen im Leistungs- und Kapi- talverkehr (III + IV)	+ 1 952	- 140	+ 7 009	- 10 262	+ 21 912	+ 16 358	+ 15 690	+ 26 428
VI. Ausgleichsposten zu Ver- änderungen der zentralen Währungsreserven durch Zuteilungen von Sonder- ziehungsrechten und durch Wertminderungen	-	-	-	- 4 099	+ 738	- 5 369	- 496	- 10 279
VII. Devisenbilanz (Überschuß: +)	- 1 952	+ 140	+ 7 009	- 14 361	+ 22 650	+ 10 989	+ 15 194	+ 16 149

TAB. 14: Hauptposten der Zahlungsbilanz der BRD, in 10^6 DM,
nach /50/.

(umfaßt Handels-, Dienstleistungs- und Übertragungsbilanz) von $12,4 \cdot 10^9$ DM in ein Defizit von $1,6 \cdot 10^9$ DM umkehren. Es würden also wesentlich weniger Kapitalmittel in die BRD zurückfließen. Die Auswirkungen der Importverteuerung auf die Kapitalmarktsituation sind dabei in dreierlei Hinsicht problematisch:

- sie schaffen Kapitalabflüsse in den Industrieländern, in denen gerade dieses Kapital für die Leistungsfähigkeit der Volkswirtschaft benötigt wird.
- sie vermehren die Verschuldung der kapitalschwachen und rohstoffarmen Entwicklungsländer und vergrößern somit deren Abhängigkeit von den Geberländern.

- Es entstehen enorme Devisenüberschüsse in den energieexportierenden Staaten, da das hereinströmende Kapital aufgrund der besonderen Wirtschafts- und Bevölkerungsstruktur dieser Länder nicht in demselben Umfang wieder ausgegeben werden kann (Abb. 19).

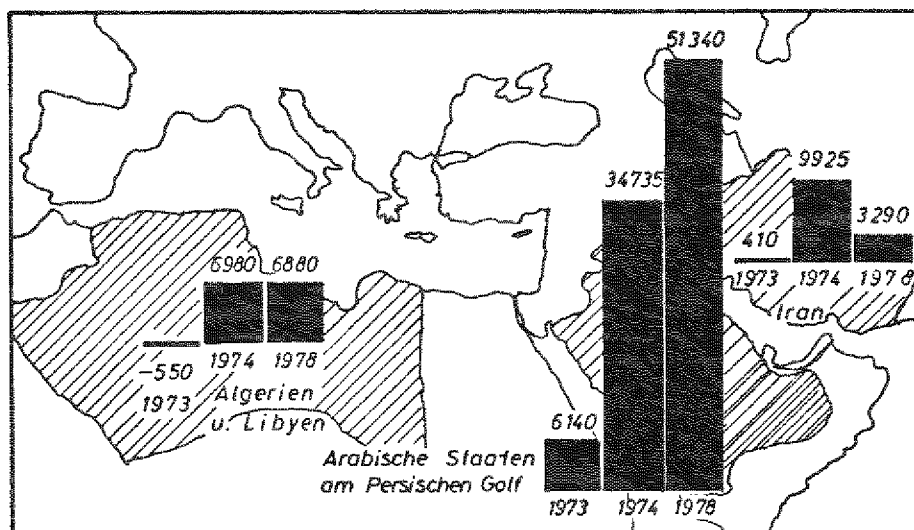


ABB. 19: Devisenüberschüsse in arabischen Ländern und im Iran (staatliche Öleinnahmen abzüglich aller Importe in 10^6 \$, Quelle: Schätzungen der EG-Kommission)

Aus dieser ungleichen Verteilung der Kapitalmärkte können eine ganze Reihe von kritischen Entwicklungen folgen, falls es nicht gelingt, den Rückfluß der Gelder aus den Einnahmeländern ("Recycling of Petrodollar") zu erreichen. Gefahren könnten vor allem in Form einer ständigen Währungsunruhe mit Folgen für den Welthandel, einer weltweiten Rezession durch einen allgemeinen Kapitalmangel, einer Inflationszunahme durch die mit hohen Kapital- und Zinskosten verbundenen wachsenden Kostenbedingungen, Verteilungsprobleme der Sozialpartner und dadurch ausgelöst durch sozialen und politischen Unfrieden entstehen. Die derzeitig diskutierten Lösungsansätze, welche das Ziel haben, die Verteilung der in den energieexportierenden Ländern überschüssigen Kapitalmittel über

- die freien Kapitalmärkte,
- den internationalen Währungsfonds,
- einen speziellen Entwicklungsfonds,
- eine Investitionsbank,

- Direktinvestitionen der Überschußländer,
- bilaterale oder multilaterale Exportgeschäfte

zu erreichen, sind jedoch durch eine Zerrissenheit der Meinungen auf der Seite der energieimportierenden Staaten sowie die unklare Haltung der Kapitalüberschußländer andererseits gekennzeichnet. Gemeinsamkeit bei den Energieverbrauchern besteht jedoch in einem, allerdings nur langfristig erreichbaren Ziel, neue Energietechnologien zu entwickeln, um die Abhängigkeit von teuren Energieimporten zu verringern.

1.3.4 Umweltprobleme der Energieerzeugung und -nutzung

In einer technisierten und industrialisierten Welt sind Beeinträchtigungen der natürlichen Umwelt grundsätzlich nicht zu vermeiden, denn bei jeder künstlichen Stoff- oder Energiewandlung wird ein Eingriff in die Natur vorgenommen. Die Auswirkungen der Aktivität des Menschen auf seine physische Umwelt (Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre, Biosphäre) blieben solange ohne negative Folgen, wie die Schädigungen relativ klein und lokal begrenzt waren, so daß das natürliche globale Gleichgewicht nicht gestört wurde.

Heute ist jedoch das Ausmaß der Schadstoff- und Wärmefreisetzungen in den Zentren der industriellen Produktion und in den Verdichtungsräumen so hoch, daß ein Eingriff in das uns umgebende Ökosystem droht. Es werden daher Maßnahmen für die Zukunft erforderlich, welche auf eine wirksame Begrenzung der Umweltbelastung abzielen, sollen nicht die natürlichen Lebensbedingungen in Frage gestellt werden. Dabei ist jedoch dem notwendigen Ziel Umweltschutz auf der einen Seite, das gesellschaftspolitische Ziel materieller Lebensstandard auf der anderen Seite gegenüberzustellen. Zur Lösung des Zielkonflikts ist daher abzuwägen zwischen Nutzen, Schaden und Risiken der an diesen Zielen orientierten Aktivitäten.

Umweltprobleme lassen sich u.a. nach ihren Ursachen oder Wirkungen sowie nach Zeit- und/oder Ortsdimensionen charakterisieren. Dabei sind

- die Schadstoffemissionen,
- die Abwärmeverteilung
- die siedlungsstrukturellen Aspekte

drei große Problemkomplexe, die im engen Zusammenhang mit der Energieerzeugung und -nutzung stehen. Am Beispiel der elektrischen Energieerzeugung läßt sich zeigen, daß von ihnen eine Vielzahl von Wirkungen auf Klima, Lebewesen, Materialien und Landschaft ausgeht (Abb. 20).

Wirkungen auf Ursachen	Klima Lebewesen Materialien Landschaft			
	Klima	Lebewesen	Materialien	Landschaft
O_2 -Verbrauch	■			
CO_2 -Erzeugung	■	■		
SO_x, NO_x , etc.	■	■	■	
Staub	■	■		■
Ölverluste, Auswaschungen	■	■		■
Radioaktivität		■		
Abwärme	■	■		■
Platzbedarf				■

Kraftwerke mit			
Kohle	Öl	Spaltung	Fusion
■	■		
■	■		
■	■		
■	■		
■	■	■	?
■	■	■	?
■	■	■	?

■ akute, schwer zu beherrschende Wirkungen

■ weniger gravierende Wirkungen

* nur Unfallrisiko

ABB. 20: Qualitative Darstellung der Umweltauswirkungen der elektrischen Energieerzeugung, nach /58/.

Die bedeutendsten Quellen der Umweltbeeinflussung durch Schadstoffemissionen sind durch die Energieumwandlung in konventionellen thermischen Kraftwerken sowie durch den Energieverbrauch im Haushalt- und Verkehrssektor gegeben, wie Tab. 15 zeigt.

Kraftwerke, Haushalte und Industrie beeinträchtigen die Umwelt im wesentlichen durch die bei der Verbrennung fossiler Substanzen emittierten Schwefeldioxide, Staub und Stickoxide, während durch die Verbrennungsprozesse im Verkehr die Hauptemissionen von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid gestellt

Emittent	SO ₂	%	Staub	%	NO _x	%	C _m H _n	%	CO	%
Kraftwerke	1,5	46,8	0,2	28,6	0,6	31,6	0,01	1,9	0,01	0,2
Haushalte	1,6	18,8	0,3	42,8	0,2	10,5	0,1	19,3	0,9	13,8
Industrie	1,0	31,3	0,1	14,3	0,5	26,3	0,01	1,9	0,03	0,5
Verkehr	0,1	3,1	0,1	14,3	0,6	31,6	0,4	76,9	5,6	85,5
INSGESAMT	3,2	100	0,7	100	1,9	100	0,52	100	6,54	100

TAB. 15: Schadstoffemissionen in der BRD für 1971 in 10⁶ t/a und in %, nach /49/.

werden. Von entscheidender Bedeutung für die Schadstoffbelastung der einzelnen Emittentengruppen ist die Energieträgerstruktur in den Umwandlungs- und Verbrauchsbereichen. Zur Beurteilung der unterschiedlichen verursachenden Faktoren sind die spezifischen Emissionen nach Sektoren getrennt in Tab. 16 angegeben.

Verbraucher	SO ₂	Staub	NO _x	CmHn	CO
<u>Stromerzeugung</u>					
Steinkohle	26	3,5	7	0,1	0,5
Braunkohle	23	4,5	8,5	0,1	0,1
Heizöl	23	1	7	0,2	0,1
Erdgas	-	-	5	-	-
<u>Industrie</u>					
Steinkohle	26	6,7	6,5	0,4	5,0
Steinkohlenkoks	19	3	6,5	0,3	5,0
Braunkohle	23	10	7	0,1	5,0
Heizöl S	23	1,5	5	0,8	0,2
Heizöl EL	8	1,5	5	0,8	0,2
Erdgas	-	-	5	-	-
<u>Haushalte und Kleinverbraucher</u>					
Steinkohle	20	24	1,5	5	50
Steinkohlenkoks	19	12 ⁺	1,5 ⁺	5 ⁺	50 ⁺
Braunkohle	12	14	2	8	50
Heizöl	8	0,2	1,5	0,2	1,0
Erdgas	-	-	1,5	-	-
<u>Verkehr</u>					
Vergaserkraftstoff	0,3	1,5	8,1	9,6	270
Dieselmkraftstoff	7	2,5	7,0	1,6	30

TAB. 16:

Spezifische Emissionen in kg Schadstoff je tSKE, nach /51/.

⁺ geschätzte Werte

Aus diesen Angaben ist ersichtlich, daß durch den Einsatz von Steinkohle, Braunkohle und Heizöl in Kraftwerken, Industrie und Haushalten im wesentlichen SO_2 - und NO_x -Emissionen verursacht werden, daß durch die Verwendung von Vergaser- und Dieselkraftstoffen im Verkehr die Hauptmengen an C_mH_n und CO erzeugt werden, während in allen Verbrauchssektoren Erdgas als emissionsärmster Energieträger anzusehen ist.

Die umweltbelastenden Faktoren wurden im vorangegangenen Abschnitt nur als Durchschnittswerte betrachtet, die sich gleichmäßig über die gesamte Fläche der BRD verteilen. In Wirklichkeit sind jedoch wegen der lokal unterschiedlichen Energiefreisetzungen große Abweichungen vorhanden. Daher können die angegebenen mittleren Emissionswerte um Größenordnungen übertroffen werden (wie die Abb. 21 und 22 zeigen), wenn man die regionale Verteilung betrachtet.

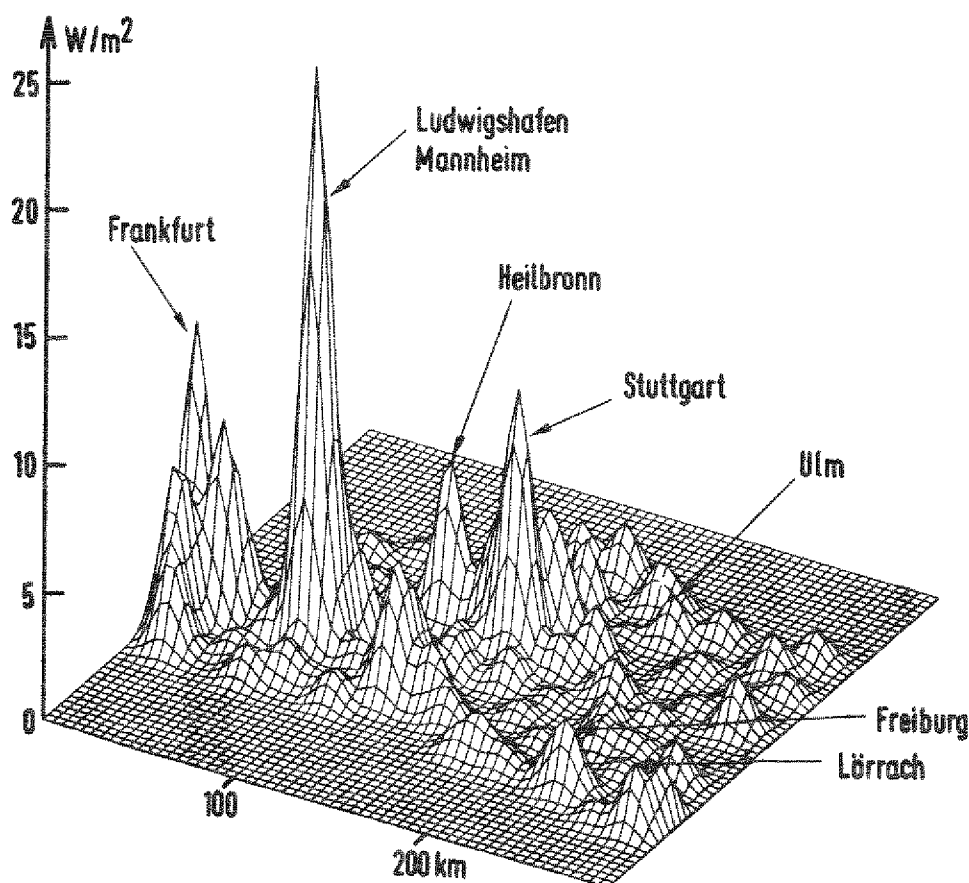


ABB. 21: Gesamte Energiefreisetzung (Jahresmittel) in Süd-West-Deutschland 1970, nach /52/.

Aus den graphischen Darstellungen ist ersichtlich, daß belastungsmindernde Maßnahmen zuerst in den Verdichtungsräumen ansetzen müssen. Das gilt insbesondere für die Auswahl der Energieträger und die Art der Energieumwandlung.

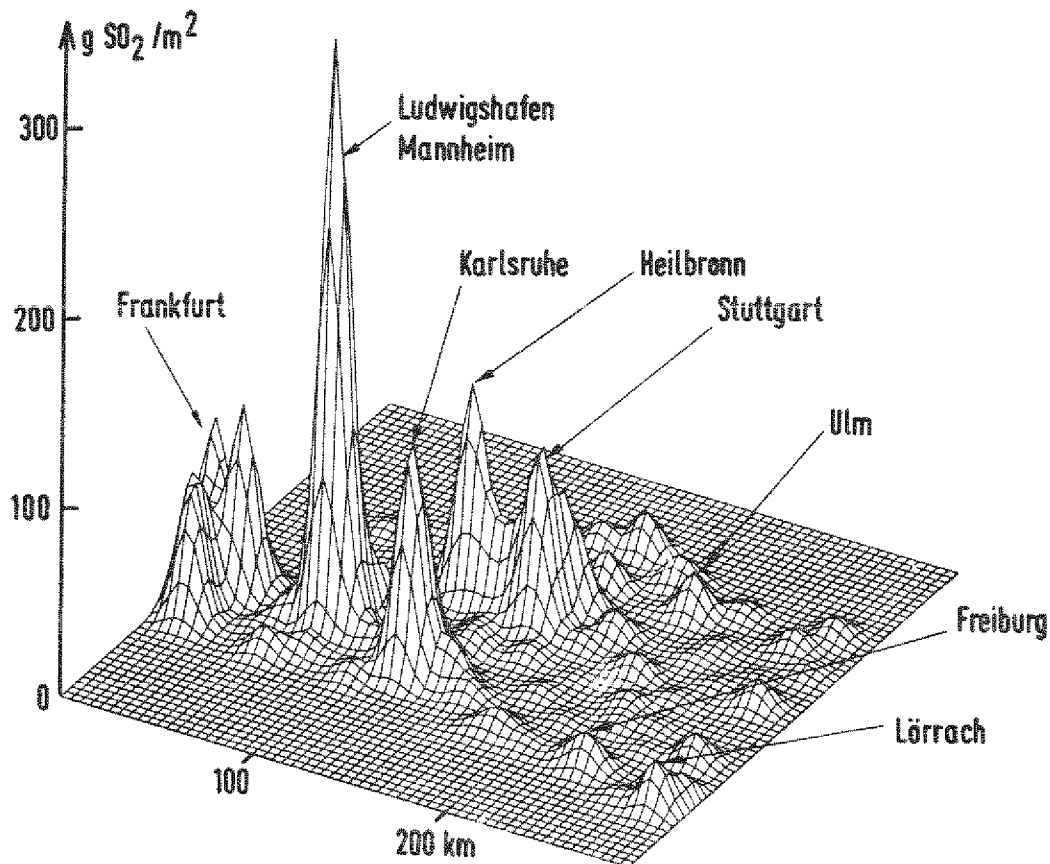


ABB. 22: SO_2 -Emissionsdichte (Jahresmittel) in Süd-West-Deutschland 1970, nach /52/

Langfristig dürften daher in Ballungsgebieten nur solche Energietechnologien Einsatzchancen haben, die entweder emissionsfreie bzw. -arme Energieträger (Erdgas, Strom, Fernwärme, Fernenergie, Wasserstoff) verwenden oder eine Emissionsverminderung durch Brennstoff- oder Abgasbehandlung bei den schadstoffreicheren Energieträgern (Steinkohle, Braunkohle, Heizöl) erreichen.

Während sich die Emissionen der fossilen Verbrennungsprodukte SO_2 , NO_x , CO , C_mH_n und Staub durch einen entsprechenden Aufwand in sehr erheblichem Maße reduzieren lassen, trifft das für das bei der Verbrennung freiwerdende CO_2 nicht zu. Im Gegensatz zu den anderen Emittenten, die sich lokal begrenzt auswirken, breitet sich CO_2 global aus und tritt in den Kohlenstoffkreislauf der Erde ein. Dieser Kreislauf, der durch Assimilation und Atmung, durch Zersetzung organischer Substanz, durch Ausbreitung von CO_2 in der Atmosphäre und die Lösung von CO_2 in den Gewässern gekennzeichnet ist, befand sich in der Vergangenheit im Gleichgewicht. Erst seit Ende des 19. Jahrhunderts ist ein stetiger Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre festzustellen, der auf den wachsenden Verbrauch fossiler Brennstoffe zurückzuführen ist. Eine

Änderung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre führt jedoch zu einer spürbaren Änderung der Temperatur der unteren Luftschichten, wie in /54/ nachgewiesen wird.

In dieser Arbeit /54/ wurden mit Hilfe eines Simulationsmodells CO_2 -Konzentration und Temperaturänderung unter der Hypothese berechnet, daß der Energiebedarf der Welt ausschließlich durch fossile Energieträger gedeckt würde. Die dabei aus der zunehmenden atmosphärischen CO_2 -Konzentration resultierende Temperaturänderung ist in Abb. 23 wiedergegeben.

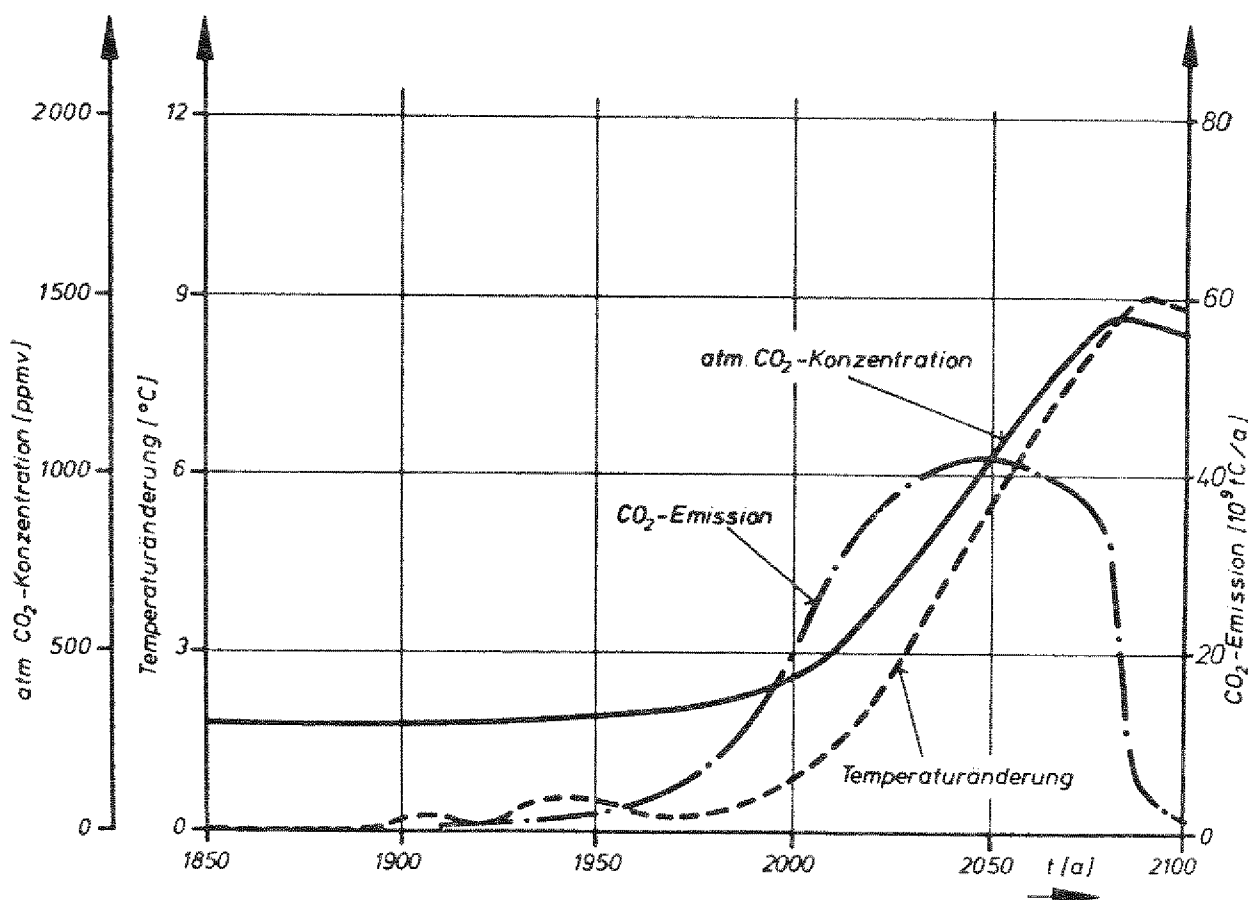


ABB. 23: Globale Temperaturänderung aufgrund zunehmender atmosphärischer CO_2 -Konzentration, nach /54/.

Aus dieser Modellrechnung wird deutlich, daß für die Energiebedarfsdeckung langfristig ein Übergang auf Brennstoffe, die kein CO_2 emittieren, notwendig ist.

Im Kernenergiebereich kann die Abgabe radioaktiver Stoffe im Kraftwerks-Normalbetrieb auf geringe, ungefährliche Dosen reduziert werden, wie Tab. 17 zeigt.

Kraftwerk	Edelgase Ci/a %	Jod 131/133 Ci/a %	Aerosole Ci/a %	Abwasser o. H^3 Ci/a %	H^3 Ci/a %
KWO 345 MWe1	7261 9,0	2,44 16,3	0,06 -	2,16 12,0	326 7
KRB 250 MWe1	4706 0,2	0,26 1,18	0,19 $6 \cdot 10^{-4}$	1,58 10,6	148 34,3
KKS 662 MWe1	2500 4,1	0,047 22,4	0,012 0,067	0,37 7,4	112 7,0

TAB. 17: Freisetzungsrates radioaktiver Stoffe in (Ci/a) bzw. in % der zugelassenen Werte, nach /36/.

Problematischer ist die Freisetzung radioaktiver Stoffe in der anschließenden Wiederaufarbeitung, besonders in Hinsicht auf die Abführung von Tritium und Krypton-85. Hier sind allerdings Lösungsvorschläge erarbeitet worden, die erkennen lassen, daß diese Probleme beherrscht werden, sobald die ersten grossen Wiederaufarbeitungsanlagen in der BRD gebaut werden /53/. Allerdings erfordert das immanente Gefahrenpotential der im Kernenergiebereich erzeugten radioaktiven Substanzen erhebliche Vorkehrungen zur Garantie der erforderlichen Sicherheit auch im Falle einer Störung.

Bei allen thermischen Kraftwerken ist die Abführung der Abwässer an die Oberflächengewässer und die Umgebungsluft ein besonders schwerwiegendes Problem. Auch, wenn alle Großkraftwerke mit Naßkühltürmen ausgestattet sein werden, wird die Kühlkapazität der Oberflächengewässer in der BRD etwa im Jahre 1980 erschöpft sein /3/, /51/. Daher muß mittelfristig auf die aufwendigere Trockenkühltechnik übergegangen werden. Zwar läßt sich derzeit noch nicht genau feststellen, welche Auswirkungen die Luftkondensation auf das Mikroklima hat, jedoch sind die zu erwartenden negativen Effekte im Vergleich zur Umweltbeeinträchtigung bei feuchter Kondensation äußerst gering /56/.

Die vordringlichen Aufgaben des Umweltschutzes liegen neben den erforderlichen Maßnahmen zur Belastungsminderung und Abwärmeverteilung vor allem in der Auswahl geeigneter Standorte für die Anlagen der Energiewirtschaft begründet. Dabei müssen auch die siedlungsstrukturellen Ziele der Raumordnung berücksichtigt werden. Schwierigkeiten bei der Auffindung geeigneter Standorte und bei der Festlegung von Leitungstrassen sowie bei der Durchführung der vorgeschriebenen Genehmigungsverfahren sind jedoch auf der anderen Seite für die Verzögerungen im Ausbau der Energieversorgungskapazitäten verantwortlich. Um einen kontinuierlichen bedarfsgerechten Zubau zu gewährleisten, ist vor allem bei Kernkraftwerken eine Standardisierung der Anlagengrößen sowie gleichzeitig

eine Vereinfachung und Verkürzung der Genehmigungsverfahren bei den einzelnen Standorten anzustreben. Für die Standortwahl existieren dabei zwei Alternativen. Einerseits kann durch die Kopplung mehrerer Kraftwerke an einigen wenigen Punkten (Kraftwerksparks) die gesamte nukleare Infrastruktur wie Spaltung, Wiederaufarbeitung, Transport und Service integriert und verbilligt sowie sehr gut überwacht werden. Andererseits bietet die umweltfreundliche Kerntechnik die Möglichkeit, Energie verbrauchsnahe umzuwandeln und Transportverluste zu vermeiden bzw. -kosten zu sparen. Im Einzelfall sollten bei der Standortwahl jedoch kurzfristige betriebswirtschaftliche Rentabilitätsüberlegungen hinter langfristig orientierten Umwelterfordernissen zurücktreten /3/.

2 ANSÄTZE ZUR ANALYSE MÖGLICHER ENTWICKLUNGEN IM ENERGIEBEREICH

2.1 Definition der Untersuchungsaufgabe

2.1.1 Anforderungen an die Instrumente der Entscheidungsfindung und Planung

Die Notwendigkeit einer möglichst genauen, gesicherten und umfassenden Information über Entwicklungen im Energiebereich ist unumstritten. Denn einerseits sind Vorhersagen über den künftigen Energiebedarf und seine mögliche Deckung erforderlich, damit der Ausbau der Versorgungskapazitäten die erwartete Nachfrage antizipieren kann. Andererseits zwingt die Vielzahl der ungelösten Probleme, welche mit der Energiegewinnung und -nutzung zusammenhängen, Entwicklungstrends zu analysieren, um rechtzeitig negative Effekte erkennen und alternative Versorgungsmuster anbieten zu können.

Energieprognosen hat es daher schon seit langem gegeben, und die methodischen Instrumente sind ständig verfeinert und verbessert worden. Der konventionelle Ansatz zur Analyse der künftigen Energiesituation versagte jedoch zumeist immer gerade dann, wenn klare Aussagen von den energiepolitischen Entscheidungsträgern am dringendsten gebraucht wurden. Drei Beispiele sollen dies veranschaulichen:

- So versagten die konventionellen Prognoseverfahren, als sich (etwa ab 1957) ein beschleunigter Wandel in der strukturellen Zusammensetzung der Energienachfrage (Substitution von Kohle durch Erdöl) abzeichnete, in der Einschätzung der Größenordnung dieser Strukturverschiebungen /60/.
- Etwa zur selben Zeit führten die Vorhersagen über die Höhe des künftigen Energiebedarfs zu Fehlschlüssen für das spätere Angebot an Energieträgern. Es wurde eine Energielücke angenommen, obwohl genau das Gegenteil eintraf. Die Abweichungen zwischen der Prognose (aus dem Jahre 1956) und der Realität (1965) zeigen dies.

Sie betrug, wie Angaben in /61/ zu entnehmen sind:

- 4,2 % für Steinkohle
- 31,3 % für Braunkohle

41,3 % für Mineralöl
 37,9 % für Erdgas
 10,9 % für Wasserkraft
 43,8 % für Kernenergie

- Bei nahezu allen Prognosen, die vor den Ölpreiserhöhungen im Winter 1973/74 herausgegeben wurden, wurde nachträglich eine erhebliche Revision der erwarteten Zuwachsraten im Energieverbrauch erforderlich. Dies zeigt z.B. ein Vergleich von /3/ und /33/.

Die Beispiele bestätigen, daß Vorhersagen als Instrumente der Entscheidungsfindung und Planung alleine nicht genügen können. Denn letztlich basieren nahezu alle Prognosen auf der Extrapolation der vergangenen Entwicklung einiger allgemeiner Kennziffern, z.B. des Bruttoinlandsprodukts (BIP) oder des Beitrags zum Bruttoinlandsprodukt einzelner Sektoren, und in der Subsummierung impliziter Verhaltensweisen. Sie stellen daher eine bestimmte Art der Meinungsäußerung in Form von Kurven, Diagrammen und Zahlen dar /62/.

Für die komplexen Zusammenhänge in Energiepolitik und Energiewirtschaft werden jedoch heute wesentlich feinere Instrumente und weiterreichende Informationen über eine Vielzahl von veränderlichen Größen benötigt /64/, /67/.

Denn wesentlich für die Entscheidungsfindung und Planung im Energiebereich sind nicht nur Aussagen über einen prognostizierten späteren Zustand, sondern es sind genaue Kenntnisse erforderlich, die zeigen, auf welche Weise ein bestimmtes Ziel erreichbar ist und welche Bedingungen dazu geschaffen werden müssen. "Zieladäquate" Instrumente, die der Entscheidungsfindung und Planung dienen sollen, müssen daher vor allem vier Kriterien erfüllen /65/:

- Sie müssen die Strukturzusammenhänge darstellen und Verhaltensweisen quantifizieren können.
- Sie müssen vom Prinzip der ganzheitlichen Problembetrachtung ausgehen, indem alle "relevanten" Einflußgrößen erfaßt werden.
- Sie müssen das dynamische Verhalten durch Darstellung von Ursache - Wirkungsbeziehungen, Rückkopplungen und Verzögerungen wiedergeben.
- Sie müssen in der Lage sein, die Steuerungsmöglichkeiten der Entscheidungsträger aufzuzeigen, so daß Auswirkungen von Entscheidungen und äussere Eingriffe sichtbar werden.

Mit diesen Anforderungen sind die wesentlichen Merkmale fixiert, die für die Analyse großer intuitiv nicht mehr durchschaubarer Problemzusammenhänge entscheidend sind.

Komplexe Sachverhalte mit einer großen Anzahl von Variablen lassen sich jedoch am genauesten und übersichtlichsten mit Hilfe der mathematischen Sprache beschreiben. Der hierfür wohl geeigneteste Ansatz ist die Quantifizierung der Wechselwirkungen in Form eines Modells.

2.1.2 Grundsätzliche Eigenschaften von Modellen

Bei der Arbeit mit Modellen muß von vornherein Klarheit über einige grundsätzliche Eigenschaften bestehen, die mit der Anwendung der Modelltechnik zusammenhängen, sollen die Ergebnisse nicht zu Fehlinterpretationen führen:

(1) Abbildung der Realität

Modelle entwickeln bedeutet, die Realität vereinfacht abbilden. Jedes Modell sollte irrelevante, d.h. im Hinblick auf die Zielsetzungen unwesentliche Elemente fortlassen, um die Realität leichter verstehen zu können. Denn würde ein Modell alle Merkmale erfassen, wäre es ebenso kompliziert zu handhaben wie die Realität selbst /66/.

(2) Subjektive Modellelemente

Modelle, die nicht nur auf rein physikalischen und technischen Zusammenhängen aufgebaut sind, enthalten subjektive Modellelemente. Diese sind von den Wertpräferenzen abhängig. Es kann jedoch prinzipiell nicht Ziel von Quantifizierungen sein, Systemparameter zu objektivieren. Sie können lediglich dazu dienen, solche Größen durch Zahlenzuordnungen operational zu machen /63/. Die mathematische Handhabung dieser Systemgrößen sollte daher besonders herausgestellt werden.

(3) Datenungenauigkeiten

Ungenauigkeiten in Daten lassen sich grundsätzlich nicht völlig vermeiden. Es sind daher Untersuchungen über Fehlermöglichkeiten notwendig, um gesicherte Ergebnisse zu erarbeiten. Fehlerquellen können durch Veri-

fizierung des Modellverhaltens in der Vergangenheit, durch Sensibilitäts-tests und Ursache - Wirkungsanalysen eingegrenzt werden /65/.

(4) Komplexität

Bei der Konzeption von Modellen ist zu prüfen, welchem Genauigkeitsgrad die Aussagen entsprechen müssen. Mit zunehmender Disaggregation der Strukturmerkmale wird zwar einerseits erreicht, daß die Modellstruktur das reale Verhalten besser wiedergeben kann. Andererseits werden durch die für einen höheren Komplexitätsgrad i.a. erforderlichen größeren Datenmengen zusätzliche statistische Fehler eingebracht. Die folgenden Überlegungen sollen dies verdeutlichen. Bezeichnet man mit F_S Strukturfehler, mit F_D Datenfehler, so läßt sich der tendenzielle Verlauf der Fehlerfunktionen in Abhängigkeit vom Komplexitätsgrad wie in Abb. 24 festlegen.

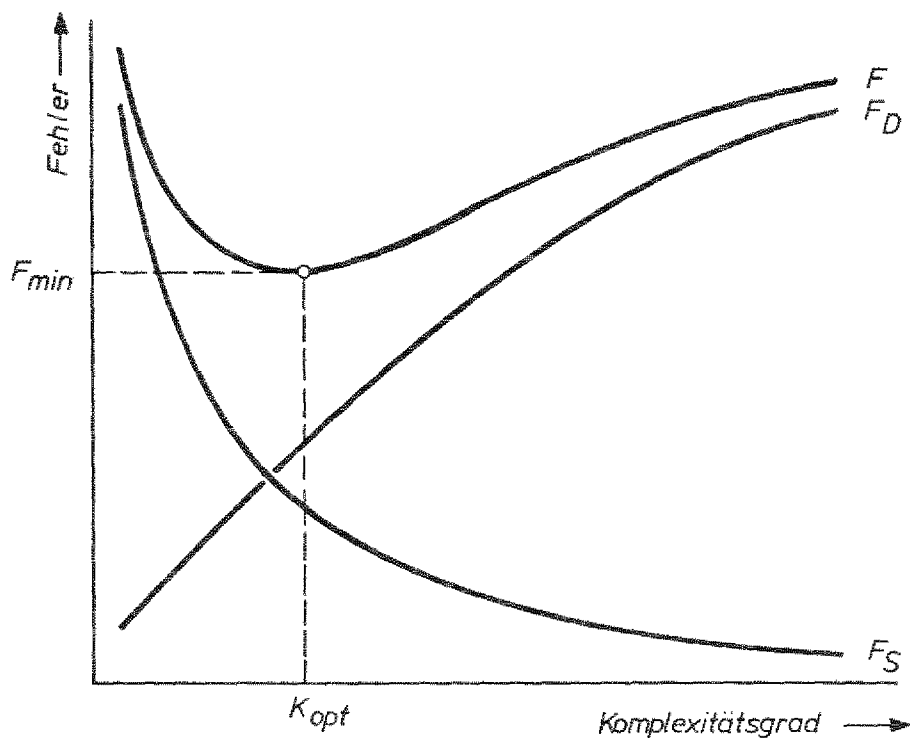


ABB. 24: Qualitative Darstellung des Gesamtfehlers in Abhängigkeit vom Komplexitätsgrad bei Modellen

Der günstigste Komplexitätsgrad ist durch den niedrigsten Punkt (K_{opt} , F_{min}) der resultierenden Gesamtfehlerkurve F gegeben.

(5) Aussagen

Ein Modell kann nur innerhalb des klar zu definierenden Aussagebereichs Entscheidungshilfen geben, denn die Modellstruktur ist auf einen bestimmten Ausschnitt aus der Wirklichkeit ausgerichtet. Daher ist es vor der Konzeption eines Modelles erforderlich, eine genaue Zielidentifikation vorzunehmen, um klarzustellen, was das Modell zu leisten vermag und wo die Grenzen der Aussagefähigkeit liegen /66/.

2.2 Identifizierung der Untersuchungsziele2.2.1 Übergeordnete Ziele und Teilziele

Als geeignetes Instrument zur Analyse von Entwicklungsmöglichkeiten in der Energiewirtschaft bieten sich mathematische Modelle an. Die Ziele, welche im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der aus diesen Modellen abgeleiteten Aussagen verfolgt werden, sollen im folgenden präzisiert werden.

Vier Untersuchungskomplexe kennzeichnen die übergeordneten Ziele, denen einzelne Teilziele zugeordnet sind:

- (1) Untersuchung der Struktureigenschaften und des dynamischen Verhaltens im Bereich Energienachfrage - Energieangebot.

Teilziele:

- Identifizierung und Quantifizierung der wesentlichen Strukturelemente auf der Energienachfrage- und -angebotsseite.
- Ermittlung von Zeitkonstanten für die Reaktionsgeschwindigkeit auf Nachfrage- und Angebotsänderungen.
- Untersuchung des Stabilitätsverhaltens bei verschiedenen gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten.

- (2) Untersuchung der kritischen Faktoren in der Energieversorgung.

Teilziele:

- Untersuchung des Einflusses der Versorgungssicherheit auf die einzelnen energieverbrauchenden Sektoren und auf die Gesamtwirtschaft.
- Darstellung der Auswirkungen von Verzögerungen im Ausbau der Versorgungskapazitäten.

- Untersuchung der Folgen der verzögerten Einführung alternativer Energietechnologien.

(3) Untersuchung erwünschter Änderungen im Energieverbrauchsbereich und in der Energiewirtschaft.

Teilziele:

- Änderung des Verbraucherverhaltens durch Einsparung und Substitution.
- Änderung der Endenergie- und Primärenergieverbrauchsstruktur mit dem Ziel einer Verringerung der Importabhängigkeit und einer Vergrößerung des Gesamtwirkungsgrades der Energieversorgung.
- Änderung der Versorgungsbedingungen durch Übergang auf heimische Primärenergiequellen.

(4) Untersuchung von Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten der wirtschafts-, energie- und forschungspolitischen Entscheidungsträger.

Teilziele:

- Beeinflussung des gesamtwirtschaftlichen Wachstums.
- Änderung der außenwirtschaftlichen Beziehungen durch Steuerung von Export- und Importströmen.
- Veränderung der Energienachfrage- und -angebotsstrukturen durch energiepolitische Maßnahmen.
- Beeinflussung der Energiesituation durch Forschung und Entwicklung im Energiebereich.

Abb. 25 gibt stichwortartig einen zusammenfassenden Überblick über die Einordnung der einzelnen Ziele in die gesamte Untersuchung.

2.2.2 Bemerkungen zur Aussagefähigkeit

Ein wesentlicher Teil der Arbeit besteht in der Darstellung der Strukturzusammenhänge und in der Quantifizierung von Verhaltensweisen. Dabei sind klare Definitionen der Modellgrößen erforderlich, um klar interpretierbare Ergebnisse zu erzielen. Hypothesen müssen in besonderer Weise kenntlich gemacht, geprüft und gegenüber den übrigen Strukturzusammenhängen abgegrenzt werden. Die mit

Allgemeines Ziel

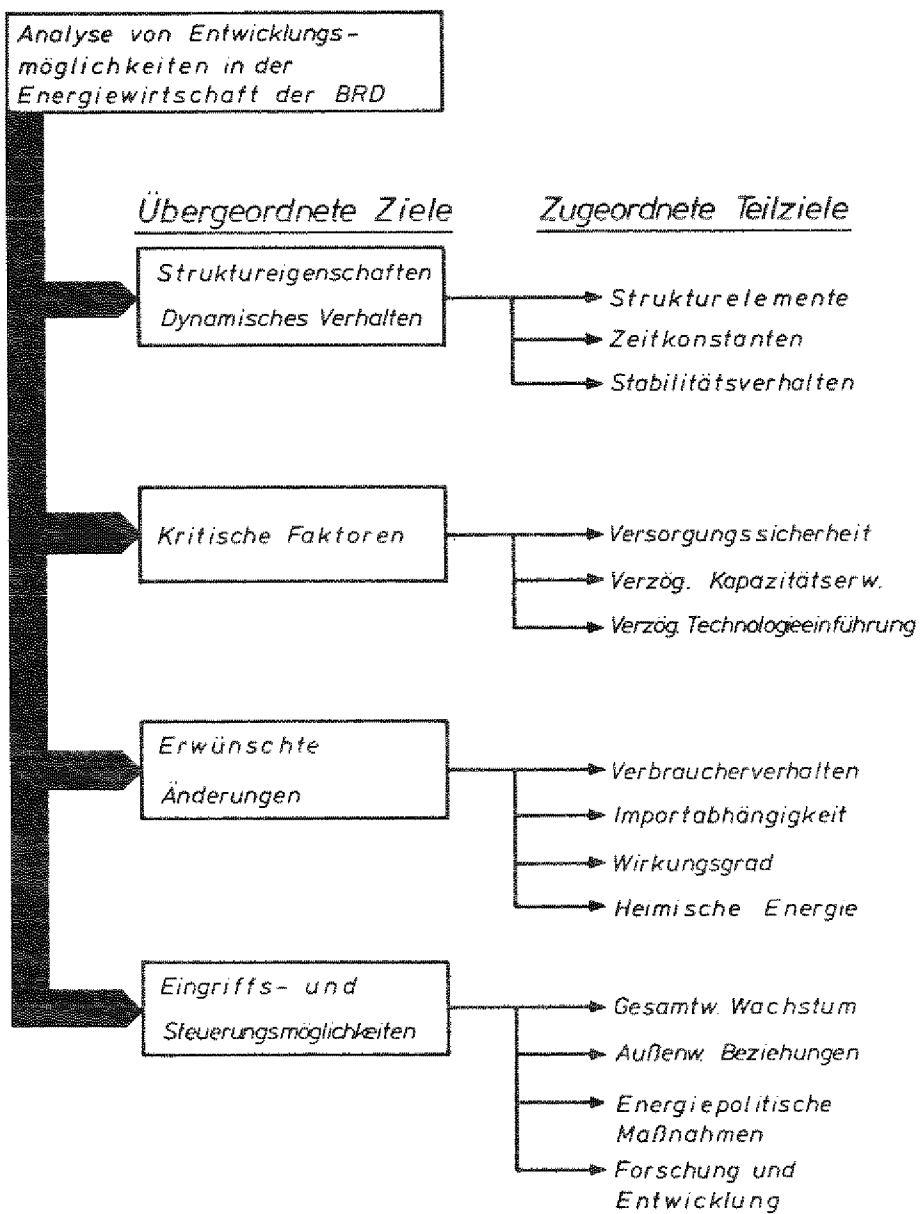


ABB. 25: Überblick über die Einordnung der Ziele in die Untersuchung

Hilfe des Modells gewonnenen Aussagen sind also nur unter Berücksichtigung der Prämissen und Annahmen interpretierbar, die explizit formuliert worden sind. Der Aussagecharakter des Modells ist daher nicht auf den der üblichen Prognosen beschränkt. Vielmehr ist beabsichtigt, eine bedingte Verhaltensanalyse für zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten zu geben. Denn die Aussage soll eine Handlung bewirken, falls sich zeigt, daß die dargestellte Entwicklung zu unerwünschten Ergebnissen führt. Ein besonderes Merkmal der Analysetechnik ist dabei das Konditionalprinzip auf Basis einer Was-Wenn-Fragestellung. Sie soll z.B. zur Beantwortung von Fragen dienen, wie: Was geschieht in den energieverbrauchenden Sektoren, wenn eine Versorgungsstörung eintritt etc.? Solche Fragestellungen sind von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Kausalzusammenhänge und zur Beurteilung alternativer Entwicklungsmöglichkeiten in der Energiewirtschaft. Aus dem Kreis möglicher Fragen, die im Zusammenhang mit einer Analyse der Energiewirtschaft stehen, wurden für diese Untersuchung die Probleme ausgewählt, die sich langfristig für die Energieversorgung der gesamten BRD stellen. Dabei liegt ein besonderes Gewicht auf der Darstellung der Beziehungen zwischen Energieverbrauch, Energieversorgung und Wirtschaftsentwicklung, wie der Zielkatalog zeigt. Die zeitliche Eingrenzung bezieht sich auf einen Zeitraum bis zum Jahre 2000. Dies geschieht einerseits deswegen, weil die langen Einrichtungs- und Bauzeiten von Energieanlagen eine langfristige Darstellung erfordern, bis Änderungen in der Versorgungsstruktur sichtbar werden. Zum anderen würden Betrachtungen, die wesentlich über das Jahr 2000 hinauszielen, wegen der vielen Möglichkeiten bis zu einem ferneren Zeitpunkt völlig neue Energietechnologien (wie z.B. die Kernfusionstechnologie) einzuführen, eine andere Zieldefinition und einen teilweise anders strukturierten Modellaufbau erfordern. Die räumliche Eingrenzung bezieht sich auf die BRD als Gesamtgebiet, da es notwendig ist, zunächst einmal die für die gesamte Volkswirtschaft dominanten Entwicklungen darzustellen, bevor sich weitere regionale Untersuchungen anschließen lassen. Diese Beschränkungen auf langfristige und das Gesamtgebiet betreffende Fragestellungen engen notwendigerweise die Aussagefähigkeit des Modellansatzes ein, so daß eine Reihe von speziellen Detailfragen, wie z.B. Fragen, die im Zusammenhang mit konjunkturellen Nachfrageschwankungen bei einzelnen Energieträgern auftreten oder regionale Verteilungs- und Standortfragen aus der Analyse ausgeklammert werden müssen. Trotz dieser Einschränkungen, vieler Vereinfachungen und der Verwendung einer notwendigerweise begrenzten Zahl von Größen zur Beschreibung der Strukturzusammenhänge

scheint jedoch eine Modellanalyse geeignet zu sein, im Sinne der Zieldefinition Aussagen über wichtige Wechselwirkungen, über mögliche kritische Entwicklungen, über erwünschte Änderungen und die dazu erforderlichen Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten im Energiebereich zu treffen.

2.3 Auswahl der Untersuchungsmethode

2.3.1 Kennzeichen verschiedener Modelltypen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten begründet wurde, lassen die komplexen Problemstellungen der vorliegenden Untersuchung die Anwendung von Modellen zur Erarbeitung von Lösungen notwendig erscheinen. Dabei ist unter einem Modell eine simplifizierte Abbildung des realen Systems (in diesem Fall der Energiewirtschaft der BRD) zu verstehen, die das tatsächliche Verhalten einer Vielzahl von Einflußgrößen mit einem bestimmten Abstraktionsgrad darzustellen vermag.

Modelle, die für Systemuntersuchungen verwendet werden, lassen sich durch verschiedene Merkmale kennzeichnen; hier soll von der in Abb. 26 dargestellten Einteilung ausgegangen werden.

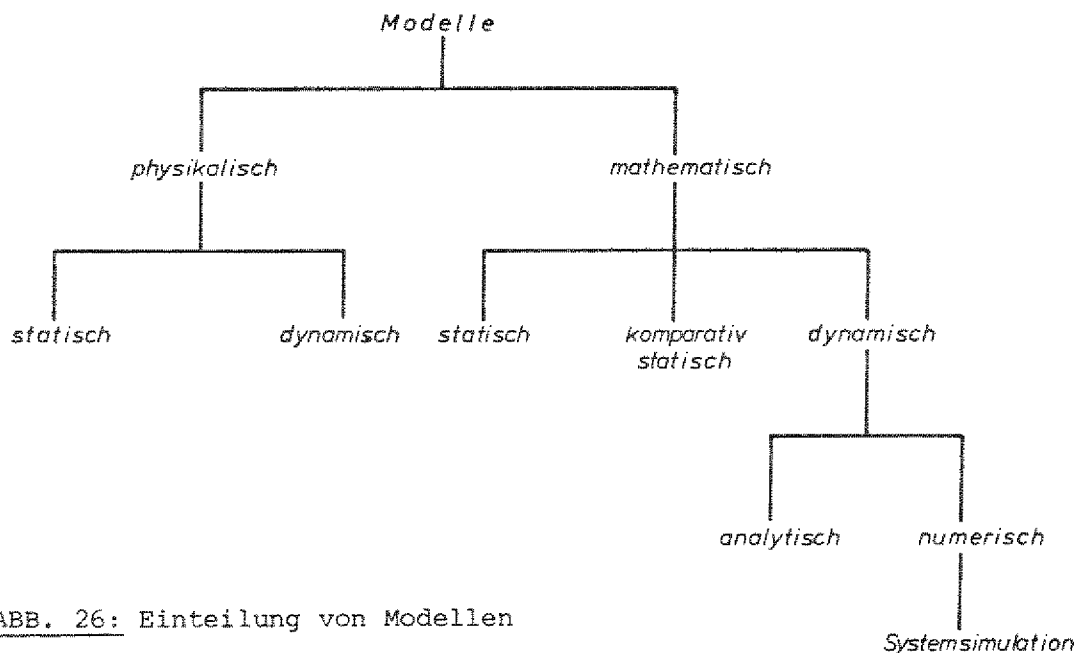


ABB. 26: Einteilung von Modellen

Prinzipiell lassen sich physikalische und mathematische (bzw. formale) Modelle unterscheiden. Systemuntersuchungen an physikalischen Modellen sind seit langem bekannt und sollen daher nicht näher erläutert werden. Mathematische Modelle haben jedoch erst in jüngster Zeit durch die Entwicklung der Datenverarbeitungstechnik größere Verbreitung gefunden. Daher erscheint eine genauere Charakterisierung der verschiedenen Arten notwendig. Mathematische Modelle lassen sich in statische, komparativ statische und dynamische Typen einteilen; ihnen gemeinsam ist die Eigenschaft, daß die Systemelemente und ihre Beziehungen durch mathematisch formulierte Parameter und Verknüpfungen dargestellt werden. Dabei gibt ein statisches Modell die Beziehungen der Systemelemente quasi für einen Gleichgewichtszustand an, oder anders ausgedrückt: statische Modelle sind nur zur Beobachtung verschiedener Gleichgewichtszustände geeignet, wobei der Übergang von einem Zustand zu einem anderen nicht betrachtet wird. Modelle, bei denen die Systemvariablen aus einer exogenen Vorgabe von Perioden der die Zustandsgrößen bestimmenden Parameter berechnet werden, bezeichnet man als komparativ statisch. Sie erzeugen zwar eine zeitliche Folge von Systemzuständen, jedoch besteht zwischen diesen Zuständen in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten keinerlei Beziehung. Determinieren die "Systemzustände vorangegangener Zeitpunkte die Parameter für die Berechnung oder logische Bestimmung des Systemszustands im gegenwärtigen Zeitpunkt und dieser wiederum die Parameter für zukünftige Systemzustände"/92/, so spricht man von einem dynamischen Modell.

In Abhängigkeit von der Komplexität des Modells kann die Beschreibung der Dynamik entweder durch eine analytische Lösung oder durch eine numerische Berechnung erfolgen. In einem analytischen mathematischen Modell wird immer eine allgemeine Lösung der systembeschreibenden Gleichungen gesucht. Ein Beispiel hierfür stellt die mathematische Berechnung der Parameter eines schwingenden Systems dar, wobei von einer allgemeinen Lösung der den Schwingungsvorgang beschreibenden Differentialgleichung ausgegangen wird. In der Realität hat man jedoch verhältnismäßig selten dynamische mathematische Modelle, deren Gleichungen sich analytisch lösen lassen. Es können dagegen häufiger Verfahren angewendet werden, die die numerische Lösung der Modellgleichungen ermöglichen. Diese Verfahren bezeichnet man als Simulationsverfahren. Bei der numerischen Lösung durch Simulation werden also die Modellparameter vorher festgelegt, und anschließend wird die entsprechende zeitliche Entwicklung des Systems "si-

muliert", während bei einer analytischen Lösung das Modellverhalten durch Variation der Parameter eines allgemeinen Lösungsansatzes untersucht wird /92/, /93/. Die mathematische Simulation läßt sich daher allgemein als Instrument zur Abbildung der Struktur realer Systeme für die Erzeugung beliebig vieler numerischer Zeitreihen der Systemvariablen definieren /95/.

Aus der Diskussion über die verschiedenen Modelltypen lassen sich für die vorliegende Aufgabe folgende Schlüsse ziehen:

Vom methodischen Standpunkt ist die dynamische Modellkonzeption allen anderen überlegen, denn sie enthält sowohl die Zustandsgrößen wie die Zustandsänderungen des Systems. Von der Anwendung her scheinen im wesentlichen Simulationsverfahren für die Lösung komplexerer Systemzusammenhänge geeignet zu sein, denn analytische Lösungen können i.a. nur bei wenigen realen Systemen gefunden werden. Wegen der beschriebenen Vorzüge wird ein dynamisches Simulationsverfahren für die vorliegende Untersuchung gewählt.

Bei der praktischen Anwendung der Simulationstechnik unterscheidet man zwischen der Beschreibung von stetigen und diskreten Systemen. Modelle diskreter Systeme sind ereignisorientiert, d.h. die Modellgleichungen stellen überwiegend logische Verknüpfungen für Bedingungen dar, bei deren Erfüllung ein Ereignis eintritt. Im Gegensatz dazu beschreiben Modelle stetiger Systeme die dynamische Entwicklung durch kontinuierliche Veränderungen. Die Stetigkeit der Zustandsänderungen wird dabei in Form von Differentialgleichungen simuliert. Alle stetigen Simulationsverfahren bauen jedoch auf der Hypothese auf, daß die in der Realität diskret ablaufenden Ereignisse zu kontinuierlichen Ereignisströmen zusammengefaßt werden können. Dies ist aber nur möglich, wenn man es mit einer Vielzahl gleichartiger unabhängiger Ereignisse zu tun hat, wie dies z.B. beim Verkauf von Produkten, die täglich gebraucht werden, vom Produktlieferanten aus beobachtet werden kann. Auf der anderen Seite würde die Verarbeitung einer Vielzahl von Einzelereignissen zu einer unverhältnismäßig großen Erhöhung der Rechenoperationen führen, so daß eine Aggregation zu Ereignisströmen aus Praktikabilitätsgründen notwendig erscheint.

2.3.2 Simulationsmethode System Dynamics

Von J.W. FORRESTER /95/, /96/ wurde in den 60er Jahren ein dynamisches Simulationskonzept (System Dynamics) und eine Simulationsmethode entwickelt, die es erlaubt, komplexe Systeme mit ökonomischen, technischen und gesellschaftlichen Systemzusammenhängen und Rückkopplungen in ein Simulationsmodell abzubilden. Die mathematische Darstellung der Systemstruktur erfolgt in diesem Simulationsansatz durch Kopplung von i.a. nichtlinearen Differentialgleichungen, die für kleine Zeitintervalle durch Differenzgleichungen approximiert und mit Hilfe eines EDV-Programms gelöst werden können. Dabei ist zur Erzeugung eines Systemverhaltens, bei dem sich die Veränderung der Modellgrößen aus sich selbst heraus entwickelt, neben der Eingabe der Systemstruktur die Vorgabe eines Anfangszustands erforderlich. Zu dem Simulationskonzept System Dynamics wurde eine Simulationssprache entwickelt /97/, die sich durch Benutzerfreundlichkeit und geringe Rechenintensität auszeichnet. Diesen Vorteilen stehen allerdings die Mängel einer beschränkten programminternen Flexibilität und eines relativ groben Iterationsverfahrens gegenüber.

Mit Hilfe der Simulationsmethode System Dynamics sind eine Reihe von verschiedenartigen Untersuchungen, so z.B. über Stadtsysteme /98/, Umweltsysteme /54/, /99/, Wirtschaftssysteme /100/, /66/, Energiesysteme /17/ und Weltsysteme /15/, /16/ ausgeführt worden. Die einfache Handhabung, die vielseitige Anwendungsmöglichkeit und das den definierten Zielen entsprechende gesamtheitliche Prinzip dieses Simulationskonzepts sind die Gründe, die trotz der erwähnten Nachteile zu einer Anwendung des System-Dynamics-Ansatzes für die vorliegende Aufgabe führten.

3 KONZEPTION EINES SIMULATIONSMODELLS FÜR DIE ENERGIEWIRTSCHAFT DER BRD

3.1 Die wesentlichen Strukturteile des Modells und der Aggregationsgrad

Aus den Untersuchungszielen, die im vorangegangenen Abschnitt diskutiert wurden, lassen sich die Schwerpunkte der Modellkonzeption ableiten. Dabei ist zunächst anhand der Fragestellungen festzulegen, welches die wesentlichen Strukturteile des Modells (im folgenden Energiemodell benannt) sind und welchen Aggregationsgrad diese haben sollen.

Im Mittelpunkt der vier übergeordneten Zielkomplexe steht die Analyse der Beziehungen zwischen Energieverbrauchern, Energieversorgern und den anderen an der volkswirtschaftlichen Leistungserstellung beteiligten Gruppen. Die Verknüpfung von Energieverbrauch und Energieversorgung ist unmittelbar durch den zwischen Nachfrage und Bereitstellung von Energie bestehenden Marktmechanismus gegeben. Andererseits erscheint aber auch die quantitative Darstellung der Produktionsbeziehungen und der dazu innerhalb der Volkswirtschaft zu schaffenden Voraussetzungen für die Erklärung der Energienachfrage notwendig, denn ein großer Teil der nachgefragten Energie wird für produktive Zwecke eingesetzt (Energieverbrauch der Industrie), während der übrige Teil der Energienachfrage (Energieverbrauch im Verkehr, in Haushalten, bei Kleinverbrauchern⁽¹⁾) mittelbar auf die volkswirtschaftliche Leistungserstellung zurückzuführen ist. Hier sind Größen wie etwa Verkehrsaufkommen, Zahl der Wohnungen oder verfügbares Einkommen zur Erklärung des Energieverbrauchs erforderlich. Die Energienachfrage ist demnach teils unmittelbar, teils über abgeleitete Größen mit der wirtschaftlichen Entwicklung innerhalb der gesamten Volkswirtschaft verknüpft. Will man das dynamische Verhalten der für die Änderung der Energienachfrage verantwortlichen Ursache-Wirkungs-Beziehungen untersuchen, so ist daher nach den Determinanten des wirtschaftlichen Wachstums zu fragen.

Zur Erklärung der Wachstumsprozesse zwischen verschiedenen Wirtschaftssubjekten sind schon sehr früh statische Modelle entwickelt worden. Sie können als

⁽¹⁾ Definition siehe 3.3.3.

Ausgangsbasis für die Beschreibung der Beziehungen in einem erweiterten dynamischen Ansatz dienen. An dieser Stelle sei nur auf QUESNAY (1758) und MARX (1867) verwiesen. KEYNES (1936) stellte ein statisches System von Beziehungen zwischen den Unternehmen, den privaten Haushalten und den Investitionen her (Abb. 27).

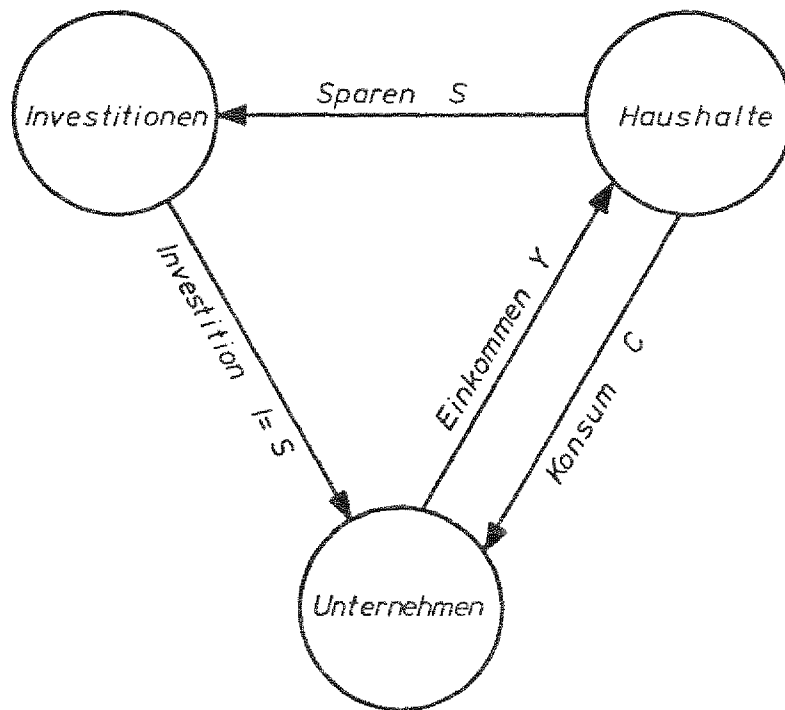


ABB. 27: Statisches Wirtschaftsmodell nach KEYNES

Dabei geht er davon aus, daß der nichtkonsumierte Teil der Einkommen gespart wird, und daß die Ersparnisse den Unternehmen für Investitionen zur Verfügung stehen. Ähnliche Vorstellungen über einen Kreislauf von Produktion, Einkommen, Konsum, Sparen und Investition zu weiterer Produktion liegt auch den erweiterten dynamischen Modellen von HARROD, DOMAR und SAMUELSON zugrunde /69/, wobei jedoch der wesentliche Unterschied zu den statischen Konzepten in den zeitverzögerten Strukturbeziehungen besteht. Time-lags können z.B. durch die Fertigungsdauer bei der Produktion oder durch Abwarten bei Unternehmerentscheidungen auftreten und daher das Wachstumsverhalten der Wirtschaft entscheidend mitbeeinflussen. In der letzten Zeit begonnene Forschungen über die Ursachen und Auswirkungen konjunktureller Zyklen gehen über die einfachen theoretischen Ansätze hinaus. Sie haben zu einer ganzen Reihe von empirisch abgeleiteten ökonomischen Modellen geführt, z.B. /70/, /71/, /72/, /73/, /74/, /75/. Diese Modelle sind vom strukturellen Aufbau her auch für den vorliegenden Fall geeig-

net, da sie die grundsätzlichen Austauschvorgänge zwischen den an der volkswirtschaftlichen Leistungserstellung beteiligten Gruppen dynamisch beschreiben. Eine direkte Adaption der Modellgleichungen für die Beschreibung der langfristigen Wechselwirkungen im Energiesektor ist jedoch im wesentlichen aus zwei Gründen nicht möglich: Zum einen handelt es sich in allen Beispielen um Konjunkturmodelle mit einem relativ kurzen Prognosezeitraum, so daß die Beziehungen durch ein völlig anderes Zeitverhalten geprägt sind als im Fall eines langfristig orientierten Ansatzes; zum anderen erscheint die Verwendung der bekannten ökonometrischen Modelle aufgrund von gesamtwirtschaftlich hochaggregierten Definitions- und Verhaltensgleichungen zur differenzierten Erklärung der Energienachfrage nach Sektoren und Energieträgern nicht möglich. Aufbauend auf die theoretisch und empirisch abgesicherten grundsätzlichen ökonomischen Strukturzusammenhänge, die auch die ökonometrischen Modelle kennzeichnen, wurde daher ein spezieller Ansatz entwickelt. Abb. 28 zeigt das zugrundeliegende Schema.

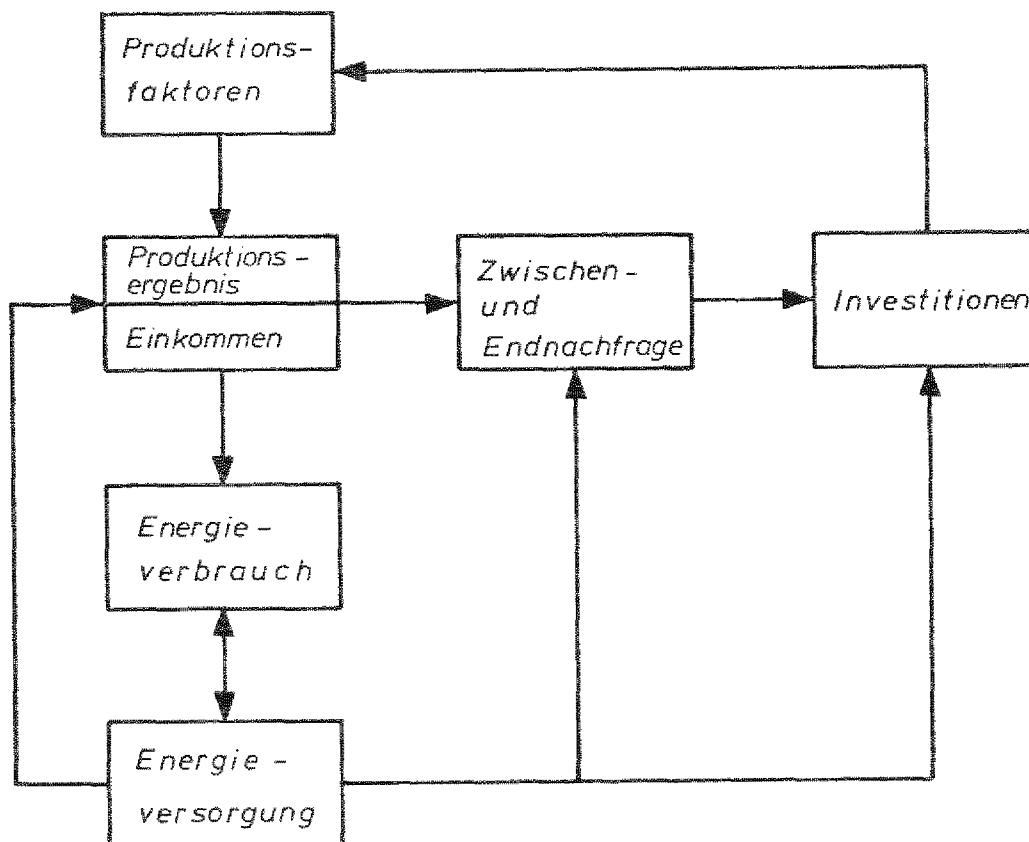


ABB. 28: Schema wesentlicher Modellteile

Als Folge des Einsatzes von Produktionsfaktoren in den Unternehmen ergibt sich ein bestimmtes Produktionsergebnis, und es werden Einkommen geschaffen. Für die Produktion werden Vorleistungen benötigt (Zwischennachfrage), die Einkommen werden zum Teil zur privaten Bedürfnisbefriedigung (Endnachfrage) verwendet. Eine Steigerung der Nachfrage führt (wenn man von möglichen anderen Einflußgrößen absieht) zu vermehrter Investition, damit zu einer Vergrößerung des Faktoreinsatzes und zu größerer Produktion. Der Energieverbrauch ist direkt oder über abgeleitete Größen vom Produktionsergebnis abhängig und mit der Energieversorgung durch einen über den Markt ablaufenden Wechselmechanismus verknüpft. Da die an der Energieversorgung beteiligten Unternehmen der Energiewirtschaft auch dem Produktionsbereich angehören, erzeugen sie folglich selbst wieder einen Teil der Einkommen, der Zwischennachfrage und der Investitionen, und sie stellen Arbeitskräfte ein.

Mit dem in Abb. 28 angegebenen Schema sind bereits die wesentlichen Modellteile fixiert. Ausgehend von diesem Ansatz wird im folgenden festgelegt, welchen Aggregationsgrad die einzelnen Teile haben sollen.

Zur quantitativen Darstellung des Energieverbrauchs scheint eine sektorale Unterteilung in die Hauptverbrauchsgruppen Industrie, Verkehr, Haushalte sowie Kleinverbraucher mit einigen Untergruppen zweckmäßig. Dadurch ist sowohl von der Entstehung des Verbrauchs als auch von der Zusammensetzung nach Energieträgern eine eindeutige Zuordnung möglich, andererseits liegt auch die mengenmäßige Verteilung des Verbrauchs auf die Sektoren in der gleichen Größenordnung:

Industrie der Steine und Erden	(STE)	
Eisenschaffende Industrie	(ESC)	
Chemische Industrie	(CHE)	Industrie
Andere industrielle Bereiche	(AIB)	
Personenverkehr		
Güterverkehr		Verkehr
Sammelheizung		
Einzelheizung		Haushalte
Übriger Verbrauch		
Gesamter Kleinverbrauch		Kleinverbrauch

Die Abgrenzung der Verbrauchergruppe Industrie wird nach den in den Energiebilanzen /7/ vereinbarten Richtlinien vorgenommen, d.h. aus dem Wirtschaftsbereich Industrie werden alle Energieunternehmen ausgegliedert, um den Verbrauch an Endenergie vom Verbrauch in der Energiewirtschaft zu trennen.

Zur Energiewirtschaft (EW) gehören demnach folgende Wirtschaftsgruppen (siehe 1.1.2):

Steinkohlenbergbau	
(und angrenzende Veredelung)	(SBB)
Braunkohlenbergbau	
(und angrenzende Veredelung)	(BBB)
Erdöl- und Erdgasgewinnung	(EOG)
Mineralölverarbeitung	(MIV)
Öff. Elektrizitätswirtschaft	
(Erzeugung und Verteilung)	(ELW)
Öff- Gaswirtschaft	
(Erzeugung und Verteilung)	(GAW)

Zur Gruppe "Andere Wirtschaftsbereiche" (AW) werden alle Unternehmen, die nicht der Industrie oder Energiewirtschaft angehören, sowie zusätzlich die Bereiche Staat und Wohnungsvermietung zusammengefaßt. Die gesamte volkswirtschaftliche Leistung wird also durch die Energiewirtschaft, die Industrie und die anderen Wirtschaftsbereiche erbracht.

Für die Abgrenzung nach Energieträgern ist es sinnvoll, die ihrem Anteil und ihrer Verwendung entsprechend "bedeutenden" Energieträger einzeln zu behandeln, die übrigen jedoch zu subsummieren, um den Aufwand gemäß der Zieldefinition zu begrenzen. Es wurde daher folgende Unterteilung gewählt:

Steinkohle, einschl. Briketts	(SK)
Koks, einschl. sonstige Steinkohleprodukte	(KO)
Braunkohle, einschl. Holz, Torf, Müll, Klärschlamm u. dgl.	(BK)
Erdöl, roh	(EO)
Mineralölprodukte	(MI)

DARUNTER:	Heizöl	(HO)
	Flugkraftstoffe	(FK)
	Vergaserkraftstoffe	(VK)
	Dieselmkraftstoff	(DK)
	Gas	(GA)
	Wasserkraft	(WS)
	Kernbrennstoffe	(KB)
	Strom	(ST)
	Fernwärme	(FW)

Weitere Energieträger, die im Zusammenhang mit neuen Energietechnologien eingeführt werden können, wie beispielsweise Wasserstoff, Synthesegas oder andere, sind hier zunächst nicht berücksichtigt worden, da sie die Modellstruktur nicht grundsätzlich verändern. Sie sind, wenn entsprechende Strategien getestet werden, zusätzlich aufzunehmen (siehe Abschnitt 4).

3.2 Die Grundstruktur des Modells

Die Grundstruktur eines Energiemodells, das die wesentlichen Strukturteile des im vorangegangenen Abschnitts dargestellten Schemas enthält und dem angegebenen Aggregationsgrad entspricht, ist in Abb. 29 wiedergegeben. Dieses Strukturbild soll den grundsätzlichen Funktionsablauf wiedergeben, nicht jedoch zur Quantifizierung einzelner Beziehungen dienen; die verwendeten Definitions- und Verhaltensgleichungen werden im Abschnitt 3.3. diskutiert.

Aus Gründen der Überschaubarkeit und zur Trennung der wesentlichen Funktionsabläufe ist das Gesamtmodell in sieben Modellsektoren untergliedert:

1. Bevölkerungs- und Beschäftigungssektor
2. Kapitalektor
3. Produktionssektor
4. Nachfragesektor
5. Investitionssektor
6. Energieverbrauchssektor
7. Energieversorgungssektor

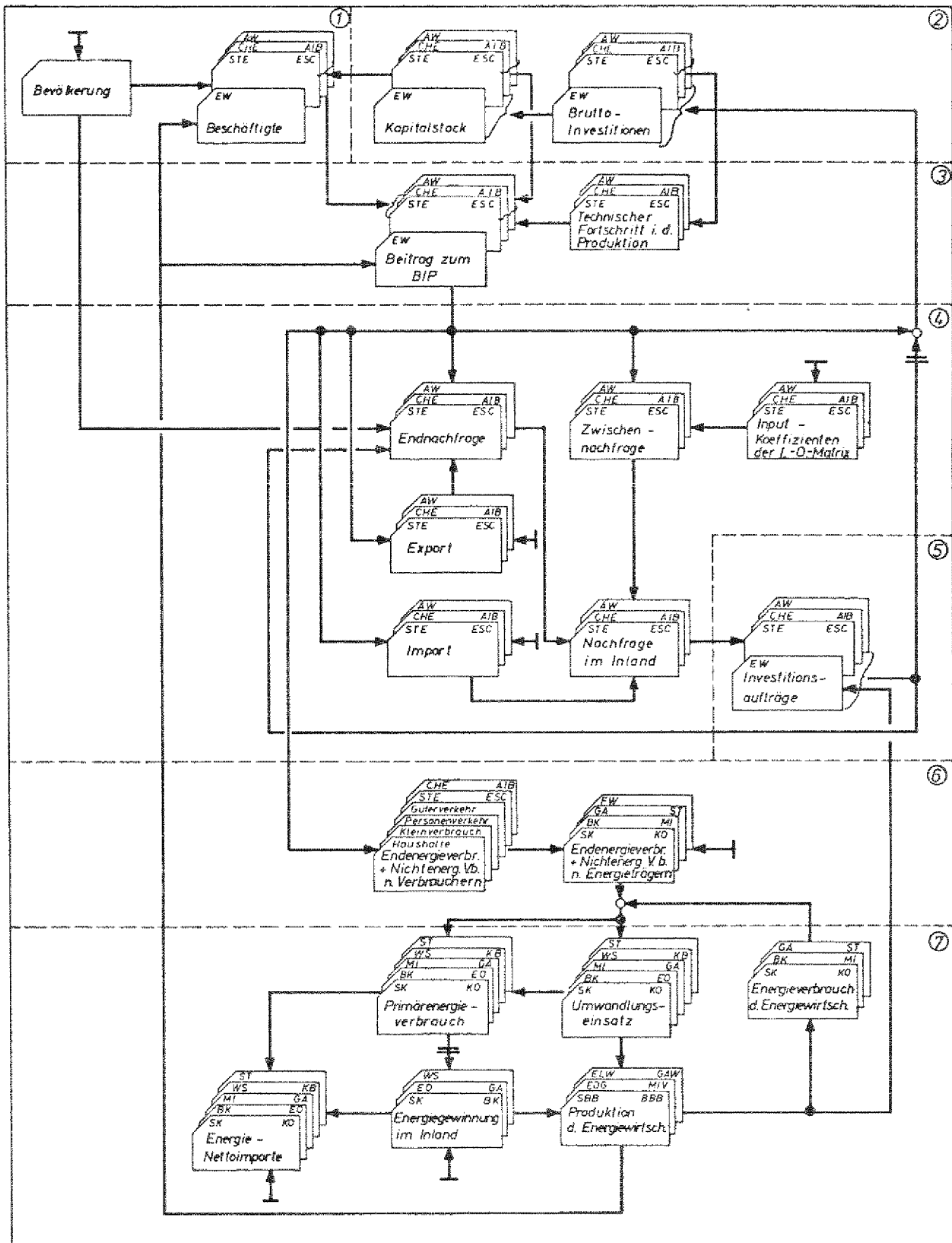


ABB. 29: Grundstruktur des Energiemodells

Im ersten Sektor wird die Zahl der Beschäftigten in den einzelnen Bereichen formuliert als Funktion des durch vorgegebene Bevölkerungszahlen und Erwerbsquoten definierten Arbeitskräfteangebots auf der einen Seite und der durch die Produktionsbedingungen (d.h. durch die Kapitalintensität der Produktion) festgelegten Arbeitskräftenachfrage der Unternehmen auf der anderen Seite.

Der zweite Sektor dient dazu, den Produktionsfaktor Kapital, also das reale Bruttoanlagevermögen (= Kapitalstock) zu bestimmen. Der Kapitalstock wird vermehrt durch Bruttoinvestitionen, vermindert um abnutzungsbedingte Abschreibungen.

Arbeitskräfte (= Beschäftigte) und eingesetztes Produktionskapital (= Kapitalstock) sind Produktionsfaktoren, durch deren Einsatz das Produktionsergebnis, gemessen als Beitrag zum BIP, (Sektor 3) bestimmt ist. Als dritte Größe wird der technische Fortschritt in der Produktion wirksam, also eine Größe, die eine Produktivitätssteigerung durch die Verbesserung der Produktionsverfahren selbst bewirkt. Diese Verfahrensverbesserungen sind gewöhnlich nur dann zu erzielen, wenn durch neue Investitionen auch die Produktionsanlagen durch Neuzugänge ersetzt werden. Daher läßt sich der technische Fortschritt eng mit den Bruttoinvestitionen korrelieren, wie in Abschnitt 3.3.2 näher beschrieben wird.

Im vierten Sektor wird die Endnachfrage für privaten und öffentlichen Verbrauch, für Investitionsgüter und für die Ausfuhr bestimmt. Die Komponenten der Endnachfrage lassen sich als Funktion des durch die Produktion geschaffenen Einkommens und der Bevölkerungszahl, durch die am BIP gemessenen öffentlichen Ausgaben, durch die Investitionsaufträge und mit Hilfe exogen vorgegebener Exportquoten festlegen. Aus der mit Hilfe einer Input-Output-Matrix gewonnenen Vorleistungsverflechtung läßt sich die Zwischennachfrage der Produktionsbereiche ermitteln, die für die Befriedigung der Endnachfrage in Form von Vorleistungen notwendig wird. Mit der Zwischen- und Endnachfrage kann unter Berücksichtigung einer exogen vorgegebenen Importquote die Nachfrage im Inland angegeben werden.

Im fünften Sektor werden die Entscheidungen der Unternehmer, die bei einer bestimmten Nachfrageentwicklung zu einer Änderung der Produktionskapazitäten führen, durch die Simulation von Investitionsaufträgen quantifiziert. Investi-

tionsaufträge beeinflussen dabei in zweierlei Weise das gesamte Wachstumsverhalten: Sie sind einerseits für die Änderung eines Teils der Endnachfrage (Investitionsgüternachfrage) verantwortlich, andererseits vermehren die fertiggestellten Investitionsgüter den Produktionsfaktor Kapital.

Im sechsten Sektor wird der Energieverbrauch der einzelnen Verbrauchsgruppen mit Hilfe der Produktionszahlen unmittelbar oder über die aus ihnen abgeleiteten Größen (Wohnungsbestand, Einkommen, Verkehrsaufkommen etc.) ermittelt. Durch die Vorgabe einer Strukturaufteilung nach Energieträgern für den Endenergieverbrauch und den nichtenergetischen Verbrauch wird dann eine Zuordnung der einzelnen Energieträger zu den Verbrauchergruppen erreicht. Verschiedene Varianten der Energieträgeraufteilung werden später durch Strategien im Hinblick auf die Vereinbarkeit mit den in Abschnitt 2 vorgestellten Zielen überprüft und diskutiert.

Die wesentliche Funktion des siebten Sektors besteht in der Bestimmung der für einen bestimmten Verbrauch an Endenergie und nichtenergetisch eingesetzten Energieträgern notwendigen Primärenergie. Dabei wird ein Teil der Endenergie (Sekundärenergieträgeranteil) über Umwandlungsprozesse mit den damit verbundenen Verlusten innerhalb der Energiewirtschaft aus anderen Energieträgern gewonnen, der übrige Teil wird durch die nichtumgewandelten Primärenergieträger gestellt. Die Deckung des Verbrauchs an Primärenergie kann entweder durch Gewinnung im Inland, zum anderen durch Einfuhr von Energie geschehen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß entsprechend der Struktur der Außenhandelsbeziehungen gewöhnlich auch ein Teil der gewonnenen Energieträger an das Ausland abgegeben wird (Netto-Importe = Einfuhren-Ausfuhren). Die Produktion der Energiewirtschaft ist durch die Gewinnung, durch Umwandlung und Verteilung von Energie mitbestimmt. Sie erfordert ebenso wie die Produktion in den anderen Wirtschaftsbereichen den Einsatz von Beschäftigten, die Vermehrung des Kapitalstocks durch Investitionen (Wachstum vorausgesetzt) und die Bereitstellung von Vorleistungen zur Befriedigung der Zwischennachfrage, andererseits trägt sie zu einem Teil zur Einkommensschaffung (über den Beitrag zum BIP) bei.

Durch die oben beschriebene Verknüpfung der Strukturelemente ist die Grundstruktur des Energiemodells und der prinzipielle Funktionsablauf in qualitativer Weise gekennzeichnet. Die quantitative Darstellung erfolgt in den folgenden Beschreibungen der Detailstruktur.

3.3 Die Detailstruktur des Modells

3.3.1 Bevölkerungs- und Beschäftigungssektor, Kapitalektor, Produktionssektor

Für die Erzielung eines bestimmten Produktionsergebnisses durch die an der volkswirtschaftlichen Leistungserstellung beteiligten Wirtschaftsgruppen ist der Einsatz von Produktionsfaktoren notwendig. Will man die innerhalb der Volkswirtschaft ablaufenden Produktionsmechanismen erklären, ist daher zunächst nach den Faktoreinsatzmengen zu fragen. Die Produktion eines Wirtschaftsbereiches hängt einerseits von den primären Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital ab, zum anderen ist sie über die Vorleistungsverflechtung mit der Produktion der übrigen Wirtschaftsbereiche verbunden. Eine Produktionsfunktion, die sowohl die primären Produktionsfaktoren als auch die multisektoralen Verflechtungen enthält, stößt jedoch bei der quantitativen Beschreibung der Parameter auf erhebliche Schwierigkeiten. Das Hauptproblem, das sich bei einem derartigen Ansatz stellt, liegt in dem unzureichenden empirisch abgesicherten Material begründet /76/. Darüber hinaus werden i.a. zwischen den Primärfaktoren substitutionale, bei den Vorleistungsverflechtungen limitationale Beziehungen unterstellt, so daß es naheliegend ist, zwei Funktionstypen zu unterscheiden: solche, welche die substitutionalen Beziehungen der Primärfaktoren wiedergeben und diejenigen, welche in bezug auf die Vorleistungsverflechtungen limitational sind. Für das hier dargestellte Modell wird der in der neoklassischen Wachstumstheorie gebräuchliche substitutionale Ansatz für die Produktionsfaktoren in Form einer COBB-DOUGLAS-Produktionsfunktion /77/ gewählt. Bezeichnet man das Produktionsergebnis mit X , die eingesetzten Primärfaktoren Arbeit und Kapital mit L und K , so läßt sich diese Funktion, die in vielen empirischen Arbeiten Verwendung findet /78/, /79/ durch folgende Beziehung angeben:

$$X = A \cdot L^{\alpha} \cdot K^{\beta} \cdot \varphi$$

Dabei ist A eine Skalierungsgröße, α und β sind die (als konstant angesehen) Produktionselastizitäten der Faktoren, und φ gibt die (als technischer Fortschritt bezeichneten) Einflüsse an, die nicht auf L und K zurückzuführen sind.

Aus der Wahl der Produktionsfunktion lassen sich die weiteren Schritte ableiten, die zur dynamischen Beschreibung der Produktionsbeziehungen erforderlich sind. Dazu sind zunächst die eingesetzten Faktormengen zu bestimmen.

Geht man bei der quantitativen Darstellung der Produktionsfaktoren von der Zahl der Beschäftigten und dem Volumen des (in konstanten Preisen) eingesetzten Brutto-Anlagevermögens (= Kapitalstock) aus, so lassen sich die Veränderungen der Faktoreinsatzmengen durch Zu- und Abgänge der Beschäftigten sowie durch die um die Brutto-Investitionen vermehrte und um die abnutzungsbedingten Abschreibungen verminderten Anlagevermögensteile angeben. Die Ausdehnung auf andere erklärende Größen für den Faktor Arbeit, etwa durch Verknüpfung von Beschäftigungszahl und Beschäftigungszeit (mit der Dimension /Mann·Stunden/Jahr/) erscheint nicht notwendig, da hiermit nicht direkt eine Verbesserung der Beschreibung erwartet werden kann. Denn einerseits müßten in diesem Fall größere Unsicherheiten hinsichtlich des vorhandenen Zahlenmaterials in Kauf genommen werden als bei einem Konzept, das sich mit den sehr genau erfaßbaren Beschäftigungszahlen begnügt. Andererseits würde ein derartiger Ansatz nur im Zusammenhang mit einer Darstellung der unterschiedlichen Qualifikationsstruktur der Beschäftigten (z.B. durch Berücksichtigung von Fach- oder Hilfsarbeiterstunden) zu einer wesentlichen Verbesserung der Aussage beitragen /50/. Im Rahmen der Zielsetzungen dieser Arbeit und wegen der Beschränkung auf eine COBB-DOUGLAS-Produktionsfunktion scheint deshalb jedoch die einfachere Darstellungsweise gerechtfertigt.

Die wesentlichen Strukturbeziehungen, die zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Produktionsfaktoren dienen, sind in Abb. 30 angegeben.

Die Zahl der Beschäftigten in den produzierenden Wirtschaftsbereichen ist durch die Nachfrage nach Arbeitskräften und durch das verfügbare Angebot an Erwerbspersonen festgelegt. Dabei wird zu den Erwerbspersonen derjenige durch Erwerbsquoten bestimmte Teil der Bevölkerung gerechnet, der direkt oder indirekt am Erwerbsprozess beteiligt ist, er umfaßt also die Erwerbstätigten und die (arbeitssuchenden) Erwerbslosen. Die Bevölkerungs- und Erwerbsquotenzahlen werden exogen vorgegeben, da es nicht das Ziel dieser Arbeit ist, die Entwicklung von demographischen Größen darzustellen. Die in Abb. 31 verwendeten Zeitreihen sind Angaben und Schätzungen in /38/ entnommen bzw. durch Extrapolationen ermittelt worden.

Erwerbspersonen und Beschäftigte determinieren die Zahl der Arbeitslosen und damit die Arbeitslosenquote. Die über einen längeren Durchschnittszeitraum ge-

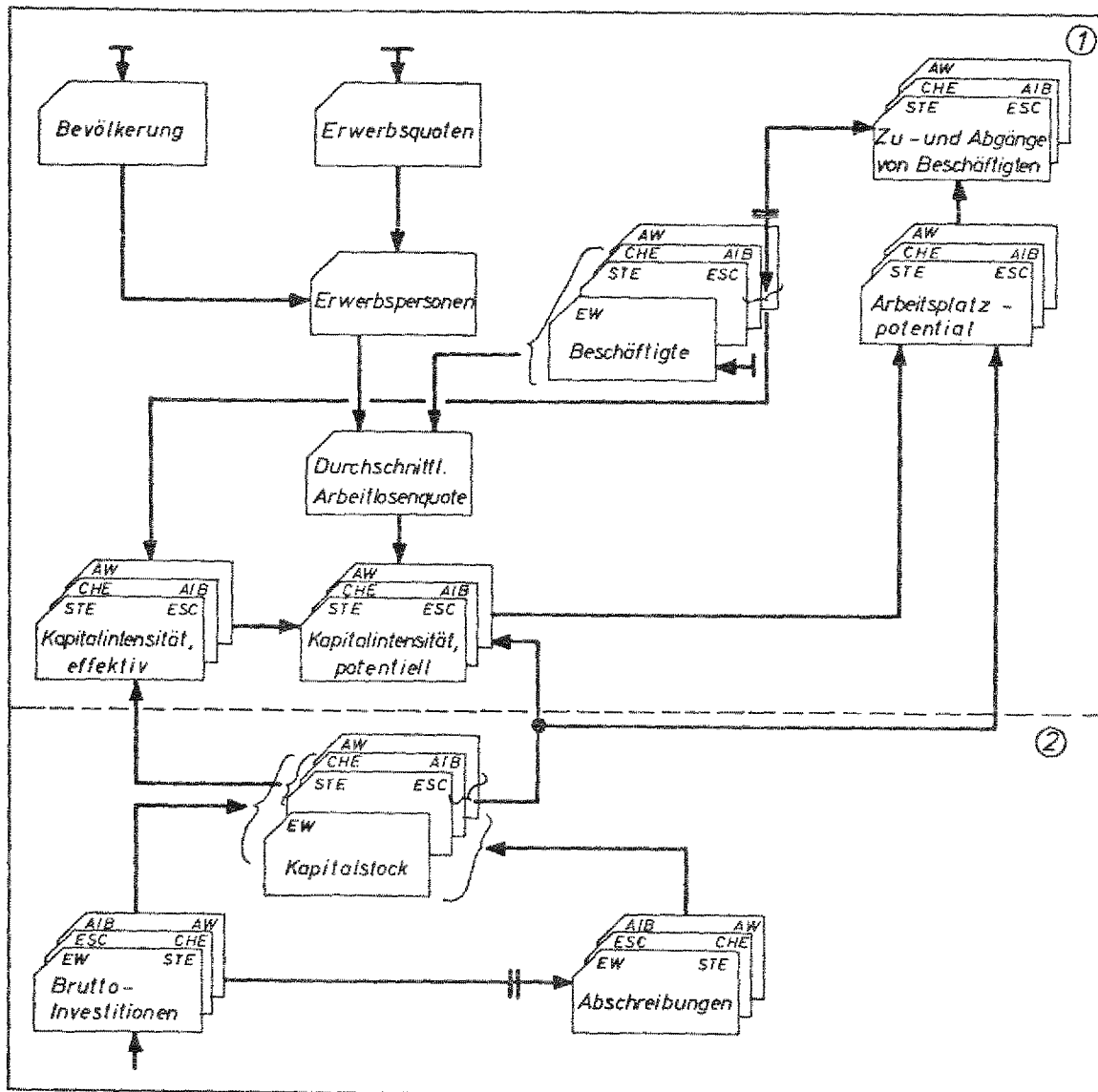


ABB. 30: Detailstruktur des Bevölkerungs- und Beschäftigungssektors (1) und des Kapitalssektors (2)

bildete Arbeitslosenquote (die also keine konjunkturellen Störungen wiedergibt) ist ein Maß für die Beurteilung der Arbeitsmarktsituation. Es wird davon ausgegangen, daß durchschnittlich relativ große Arbeitslosenquoten die Unternehmer beeinflussen werden, mehr Arbeitskräfte im Verhältnis zum Kapital einzusetzen, also die Kapitalintensität, den Quotienten aus Kapitalstock und Beschäftigten, zu verkleinern. Durchschnittlich relativ geringe Arbeitslosenquoten, als Folge eines ständigen Mangels an Arbeitskräfte, würden in umgekehrter Richtung zu einer Vergrößerung der Kapitalintensität führen. Die Veränderung der Kapitalintensität beschreibt also den Substitutionsprozess zwi-

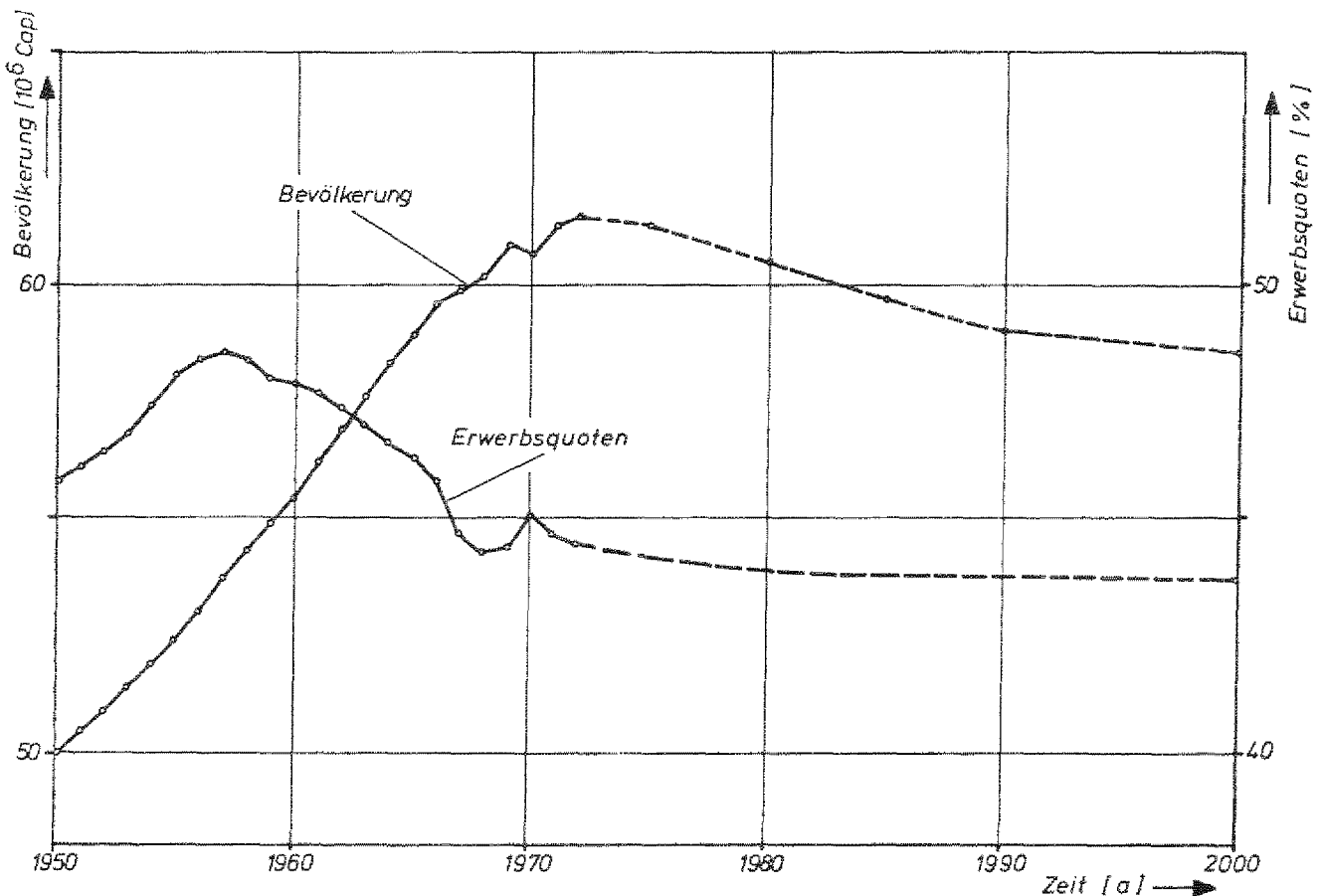


ABB. 31: Entwicklung der Bevölkerung und der Erwerbsquoten,
nach /38/

schen den Faktoren Arbeit und Kapital. Dabei wird der Mechanismus, der zusätzlich Arbeitskräftenachfrage auslöst, bzw. das angebotene Arbeitsplatzpotential um eine Einheit erhöht, mit Hilfe der potentiellen Kapitalintensität simuliert. Diese fiktive Größe zeigt an, wie sich die aktuelle (effektive) Kapitalintensität bei einer bestimmten Arbeitsmarktsituation (gekennzeichnet durch die durchschnittliche Arbeitslosenquote) und Kapitalmarktsituation (beeinflusst durch das durchschnittliche Wachstum des Kapitalstocks in der Vergangenheit) ändert. Dabei wurde folgender auf Zeitreihen der Vergangenheit beruhender Funktionszusammenhang unterstellt (Beispiel Industriegruppe Chemie, Abb. 32).

$$I_{\text{POT}} = I_{\text{EFF}} \cdot f(Q) \cdot f(K)$$

mit

I_{EFF} : Effektive Kapitalintensität

I_{POT} : Potentielle Kapitalintensität

$f(K)$: Durchschnittliches Wachstum des Kapitalstocks

Q : Durchschnittliche Arbeitslosenquote

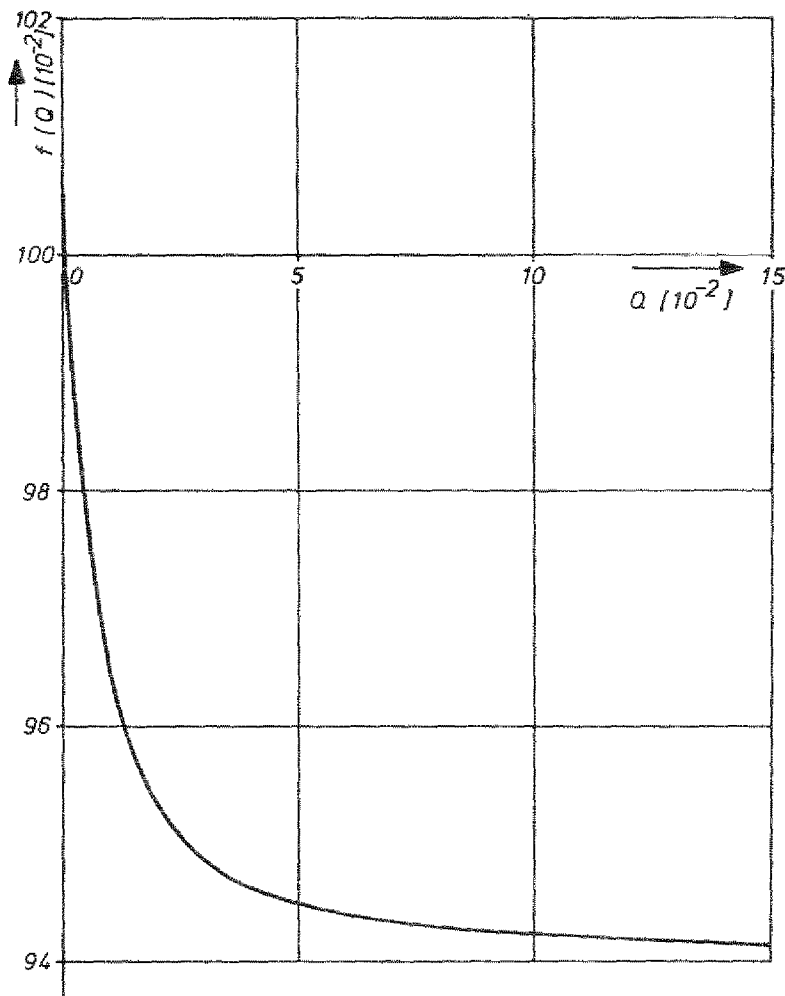


ABB. 32: Änderung der Kapitalintensität als Funktion der durchschnittlichen Arbeitslosenquote in der Industriegruppe Chemie.

Mit Hilfe der potentiellen Kapitalintensität und des Kapitalstocks läßt sich das Arbeitsplatzpotential festlegen. Diese Größe gibt an, wieviel Arbeitsplätze die Unternehmen jeweils bei einem bestimmten Faktorangebot zur Verfügung stellen. Bei dem hier unterstellten Funktionszusammenhang wurde vereinfachend angenommen, daß alle angebotenen Arbeitsplätze auch später besetzt werden können. Die Tatsache, daß die Unternehmen in Realität auch offene Stellen haben, findet keine Berücksichtigung. Unter dieser Hypothese wird sich die Zahl der Beschäftigten nach einem Zeitverzug, der die durchschnittliche Austauschzeit bei Zu- und Abgängen von Arbeitskräften kennzeichnet, entsprechend der Zahl der angebotenen Arbeitsplätze ändern.

Mit Hilfe dieses Ansatzes wurde das dynamische Verhalten im Beschäftigungssektor für jeden Wirtschaftsbereich außer für die Gruppe Energiewirtschaft,

die gesondert behandelt wird (siehe Abschnitt 3.3.4), dargestellt. Das Verfahren wurde für die Jahre 1950 - 1971 (Basiszeitraum des Modells mit aus /81, 82, 83, 84, 85, 86, 87/ entnommenen Zeitreihen für jede Gruppe überprüft. Das Ergebnis für die Gesamtwirtschaft zeigt Abb. 33.

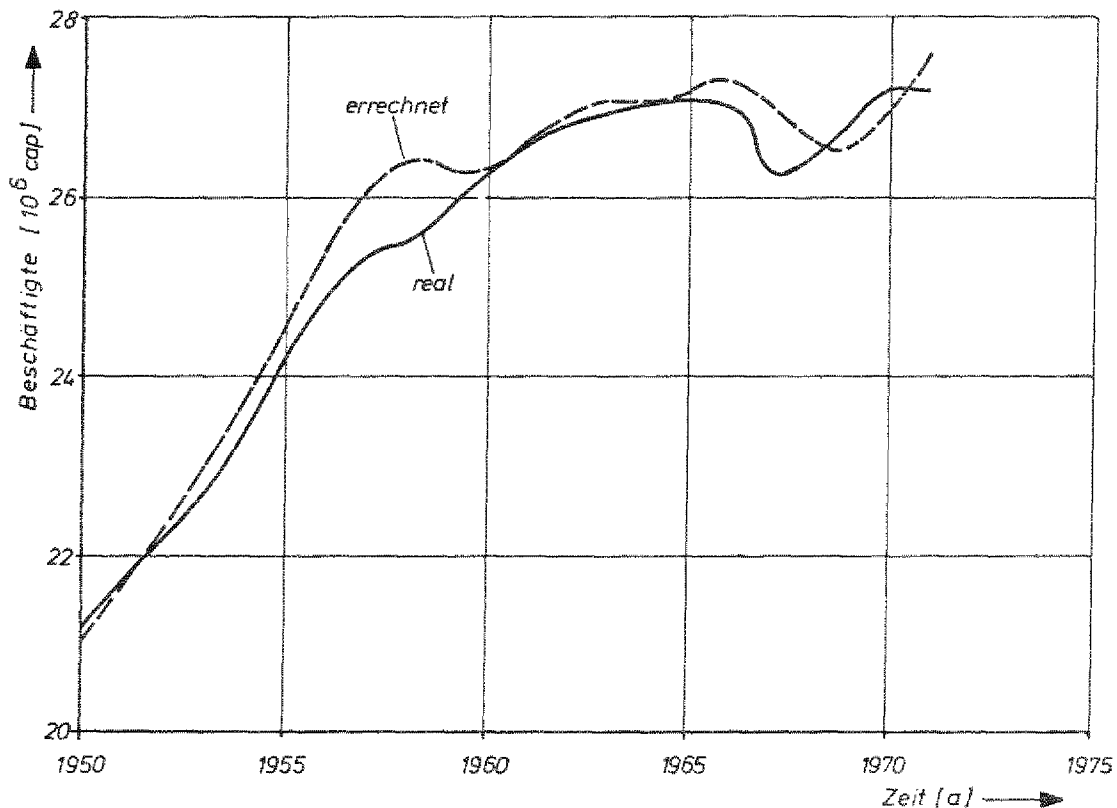


ABB. 33: Zur Verifizierung der Modellstruktur:
reale und errechnete Entwicklung der Beschäftigtenzahlen.

Der Bestimmung des Produktionsfaktors Kapital liegt eine Vermögensrechnung zugrunde, die an die in /88/ entwickelte Methode anknüpft. Dabei werden ausgehend vom realen (in Preisen von 1962 gerechneten) Bruttoanlagevermögen (= Kapitalstock) die Veränderungen in jeder Rechnungsperiode durch Brutto-Investitionen und abnutzungsbedingte Abschreibungen angegeben. Die Brutto-Investitionen ergeben sich aus der Investitionsrechnung, die in Abschnitt 3.3.2 diskutiert wird. Zur Simulation der Veränderung des Bruttoanlagevermögens wird eine Verzögerung dritter Ordnung zwischen Zu- und Abgängen mit einer mittleren als konstant angesehenen Abschreibungszeit für jeden Wirtschaftsbereich eingeführt. Mit Hilfe einer derartigen Überlebensfunktion für die Bestandteile des Anla-

gevermögens läßt sich die Entwicklung des Kapitalstocks dynamisch darstellen. Zur Überprüfung der mit diesem Modellansatz erzeugten Zeitreihen wurden für jeden Wirtschaftsbereich Referenzdaten für den Basiszeitraum aus /38, 86, 88 und 89/ herangezogen. Die Übereinstimmung der tatsächlichen und der simulierten Entwicklung wird für die Gesamtwirtschaft in Abb. 34 gezeigt.

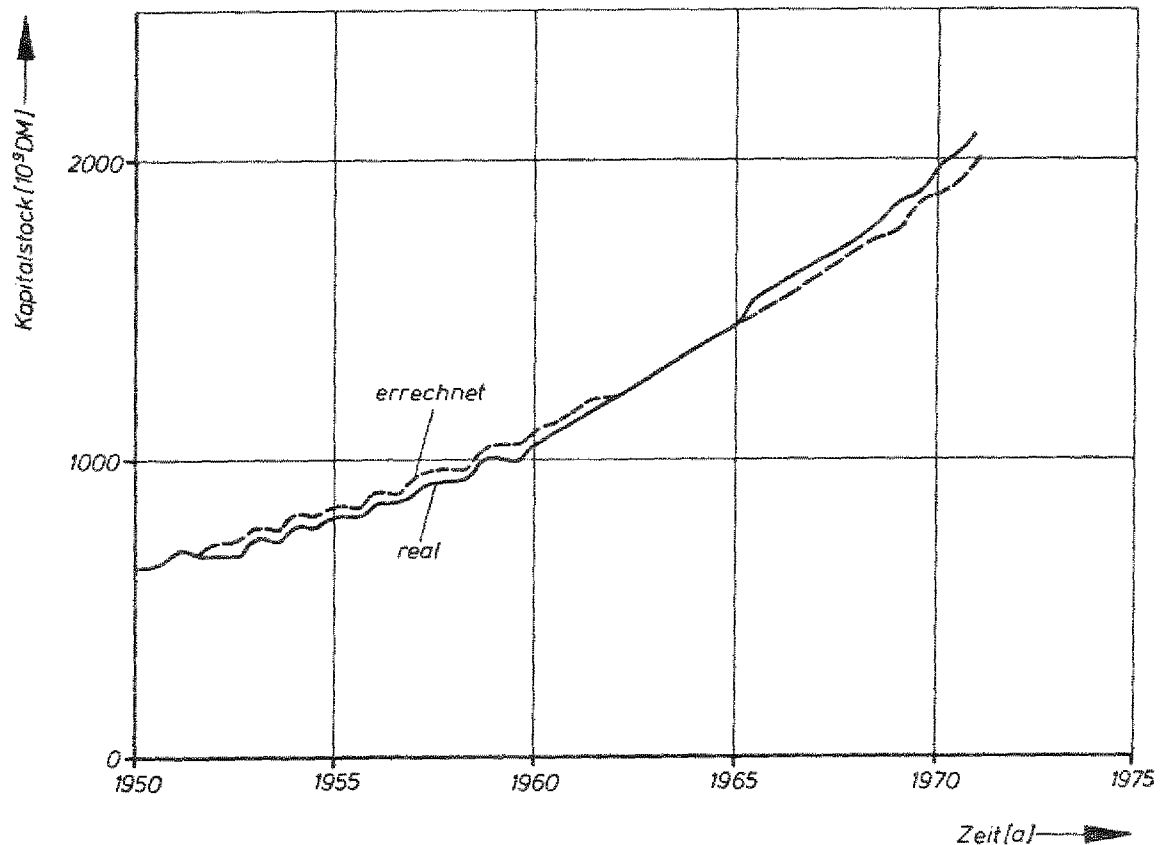


ABB. 34: Zur Verifizierung der Modellstruktur:
reale und errechnete Entwicklung des Kapitalstocks.

Die Tatsache, daß ein erheblicher Teil des Wirtschaftswachstums nicht auf einer Zunahme des Faktoreinsatzes beruht, sondern auf Verfahrensverbesserungen zurückzuführen ist, die allgemein in dem Begriff "Technischer Fortschritt" subsummiert werden, hat in der ökonomischen Literatur zu einer umfangreichen Diskussion geführt /76/. Für die Quantifizierung dieser als Restgröße in der COBB-DOUGLAS-Funktion erscheinenden Veränderlichen haben sich dabei im wesentlichen zwei Wege eröffnet: Die eine Möglichkeit besteht darin, für die Formulierung von $\varphi(t)$ eine zeitabhängige Exponentialfunktion anzusetzen /91/. Die

andere Alternative geht davon aus, daß technischer Fortschritt entweder durch Innovation in den Investitionen /91/ und/oder durch verbesserte Ausbildung in zusätzlich Beschäftigten verkörpert ist (embodied technical progress). Vor allem die Kritik an der Unterstellung, daß bei vorgegebener Wachstumsfunktion technischer Fortschritt "ohne Zutun des Menschen ähnlich wie Sonne und Regen einfach vorhanden" /76/ ist, hat dazu geführt, bei dem hier beschriebenen Modellansatz eine endogene Erklärung für $\varphi(t)$ zu verwenden. Es wurde daher gemäß dem Prinzip des "embodied technical progress" für jeden Wirtschaftsbereich (außer für die Gruppe Energiewirtschaft, siehe 3.3.4) eine Korrelationsrechnung zwischen den kumulierten Brutto-Investitionen und dem kumulierten Technischen Fortschritt ausgeführt. Dabei wurden die Zeitreihen für $\varphi(t)$ aus der Auflösung der COBB-DOUGLAS-Funktion für die Vergangenheit gewonnen und extrapoliert. Den Funktionszusammenhang für eine Gruppe zeigt beispielhaft Abb. 35.

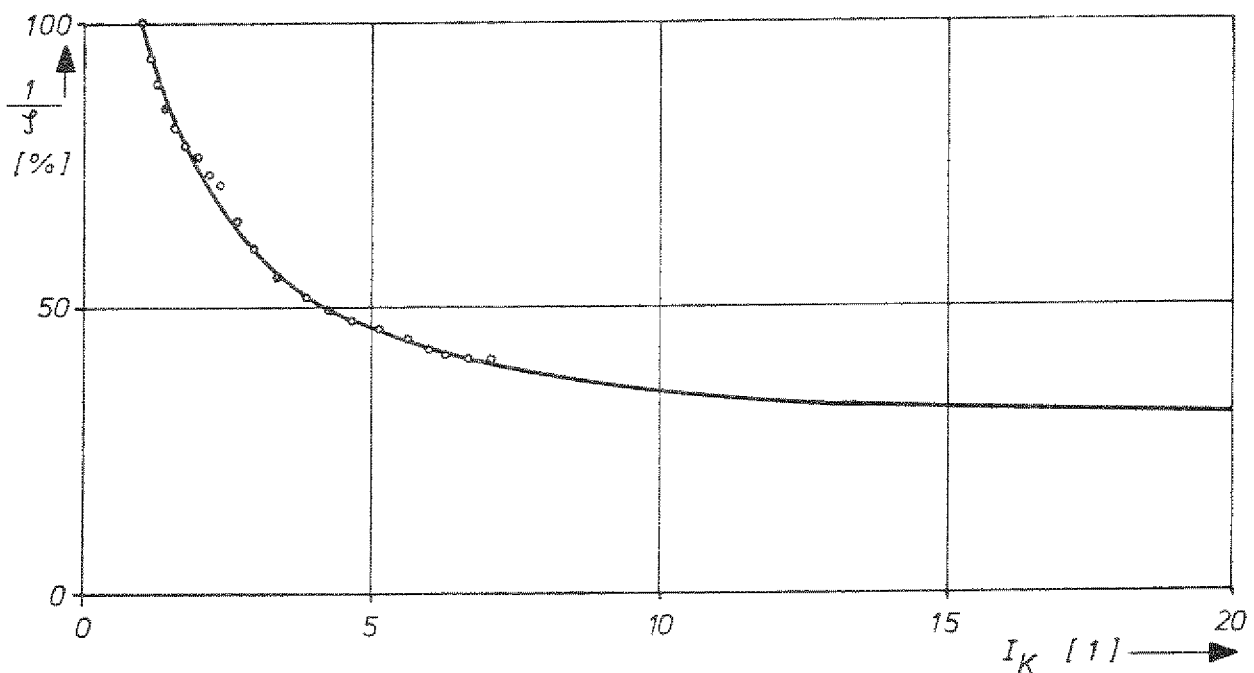


ABB. 35: Reziprokwert des kumulierten Technischen Fortschritts φ als Funktion der kumulierten Brutto-Investitionen I_K in der Industriegruppe Steine und Erden.

Nach einem in /76/ angegebenen Verfahren (bei dem Gewinnmaximierung und vollkommener Wettbewerb vorausgesetzt wird) wurden die sektorspezifischen Produktionselastizitäten α und β mit Hilfe von Einkommensgrößen geschätzt und die Skalierungsgrößen A rekursiv bestimmt.

Da sich Produktionsfunktionen nur dann sinnvoll für die mathematische Beschreibung des Produktionsprozesses anwenden lassen, wenn angenommen werden kann, daß der Output auch das Resultat der Kombination der tatsächlich eingesetzten Faktoren ist, muß zwischen effektiven und Potentialgrößen unterschieden werden. Geht man davon aus, daß die Zahl der Beschäftigten bereits den effektiven Einsatz des Faktors Arbeit darstellt, so ist der Auslastungsgrad der Produktionskapazität von der Ausnutzung des vorhandenen Anlagenpotentials, also des Produktionsfaktors Kapital, abhängig. Es wird daher eine Ziffer für die durchschnittliche Auslastung des Kapitalstocks definiert. Zahlenwerte, die /76/ und /82/ entnommen wurden, sind anschließend um konjunkturbedingte Schwankungen bereinigt worden.

Mit Hilfe der für jeden Wirtschaftsbereich (außer der Energiewirtschaft, siehe Abschnitt 3.3.4) berechneten Parameter der Produktionsfunktion läßt sich der Output, gemessen als Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt (in Preisen von 1962) bzw. die Nettoproduktion bestimmen. Die verfahrensmäßige Verknüpfung der einzelnen Größen wird durch die Abb. 36 angegeben.

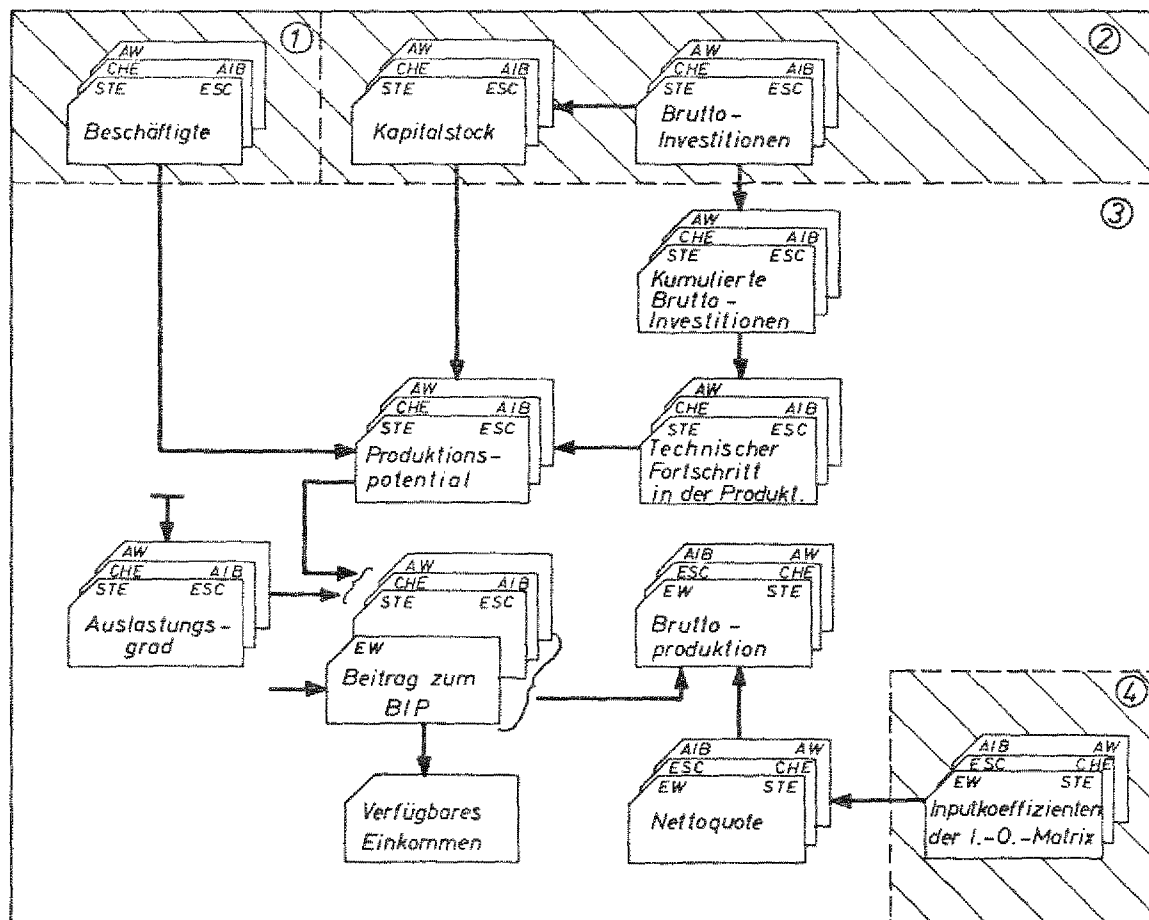


ABB. 36: Detailstruktur des Produktionssektors (3)

Die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes (BIP), der Summe der Nettoproduktion aller Wirtschaftsbereiche korrigiert um den Saldo der Erwerbs- und Vermögenseinkommen zwischen Inländern und der übrigen Welt ist mit den entsprechenden Referenzdaten für den Basiszeitraum in Abb. 37 wiedergegeben.

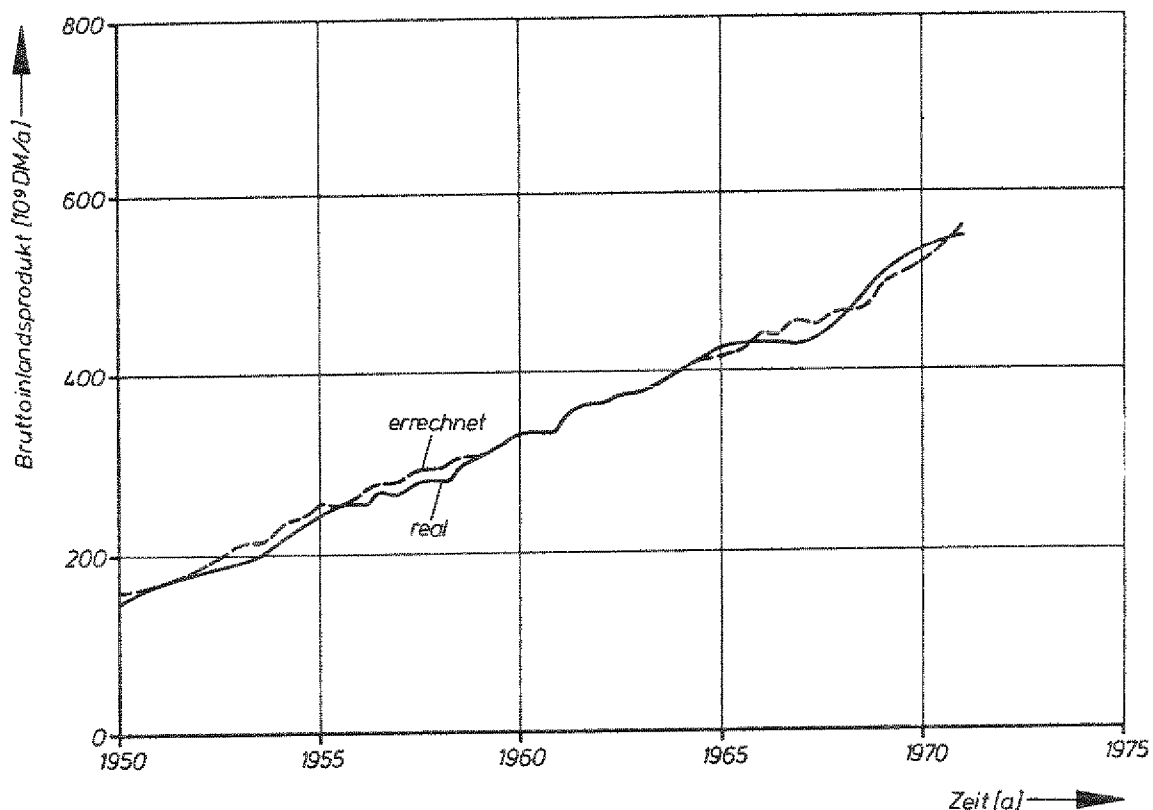


ABB. 37: Zur Verifizierung der Modellstruktur:
reale und errechnete Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes

Will man die Bruttoproduktion ermitteln, so ist die Nettoproduktion mit Hilfe der über die Input-Koeffizienten (siehe Abschnitt 3.3.2) definierten Nettoquote (= Nettoproduktion/Bruttoproduktion) umzurechnen. Da das Bruttoinlandsprodukt definitionsgemäß die gesamtwirtschaftliche Summe aus Abschreibungen, indirekten Steuern abzüglich Subventionen, Einkommen aus unselbständiger Arbeit sowie Einkommen aus Unternehmertätigkeit und Vermögen korrigiert um den Saldo der Erwerbs- und Vermögenseinkommen darstellt, enthält es zugleich die beiden wichtigsten Komponenten zur Erklärung des verfügbaren Einkommens. Die Korrelation zwischen verfügbarem Einkommen und Bruttoinlandsprodukt zeigt die Abb. 38.

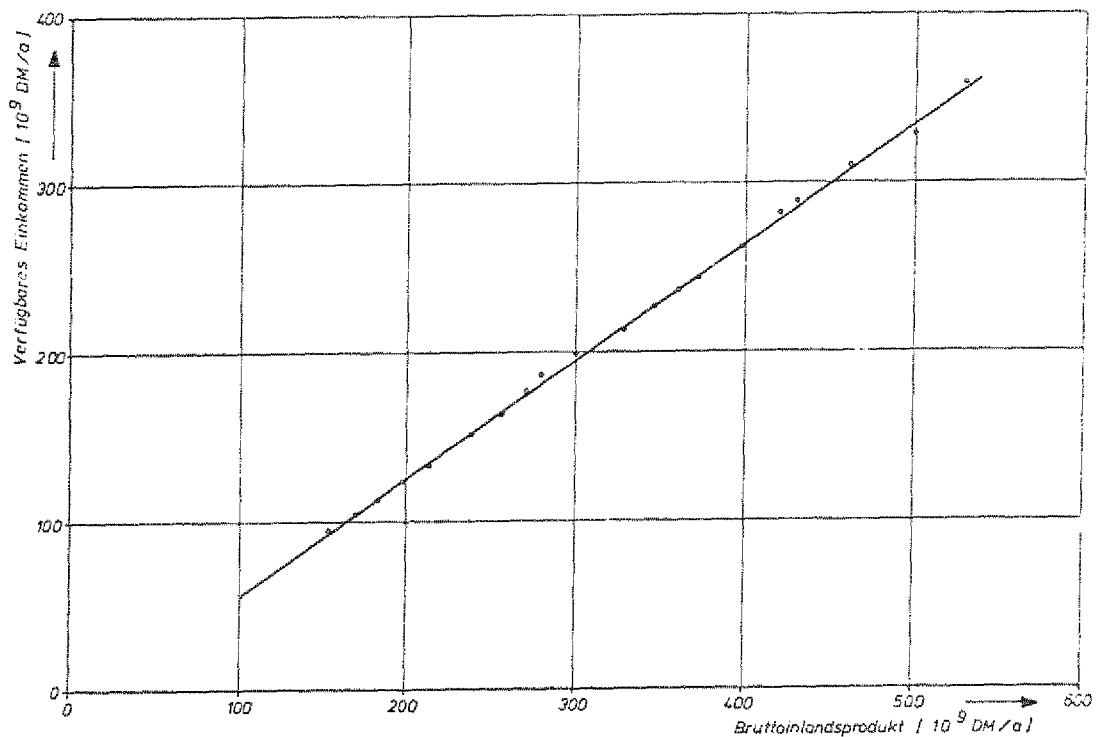


ABB. 38: Verfügbares Einkommen der Privaten Haushalte als Funktion des Bruttoinlandsproduktes (in Preisen von 1962)

3.3.2 Nachfragesektor, Investitionssektor

Die Bestimmung der Produktion mit Hilfe einer substitutionalen Produktionsfunktion setzte voraus, daß keinerlei limitationale Beziehungen von Seiten der intrasektoralen Verflechtungen bestehen. Das bedeutet, daß die für die Befriedigung der Endnachfrage bei einem bestimmten Faktoreinsatz erforderlichen Vorleistungen für alle nachfragenden Sektoren und zu jedem Zeitpunkt angeboten werden. Ausgehend von dieser vereinfachenden Vorstellung wird im vorliegenden Modellansatz die sektorale Endnachfrage endogen bestimmt und die durch sie (über die intrasektorale Lieferverflechtung) ausgelöste sektorale Zwischennachfrage errechnet, ohne dabei die Limitationalität der Produktion bei nicht befriedigter Zwischennachfrage zu berücksichtigen. Unterstellt man einen Zusammenhang zwischen Nachfrageentwicklung und den Investitionsentscheidungen der Unternehmen, so läßt sich aus der Nachfrage (Zwischen- und Endnachfrage) die Veränderung des Produktionsfaktors Kapital und folglich das Produktionswachstum erklären. Dieser Ansatz, der lediglich der konsistenten sektoralen Verknüpfung von Produktions-, Nachfrage- und Investitionsstrukturen dient, wird für die Erklärung der Investitionen in allen Wirtschaftsbereichen mit Ausnahme der Energiewirtschaft (siehe Abschnitt 3.3.4) zugrunde gelegt (Abb. 39).

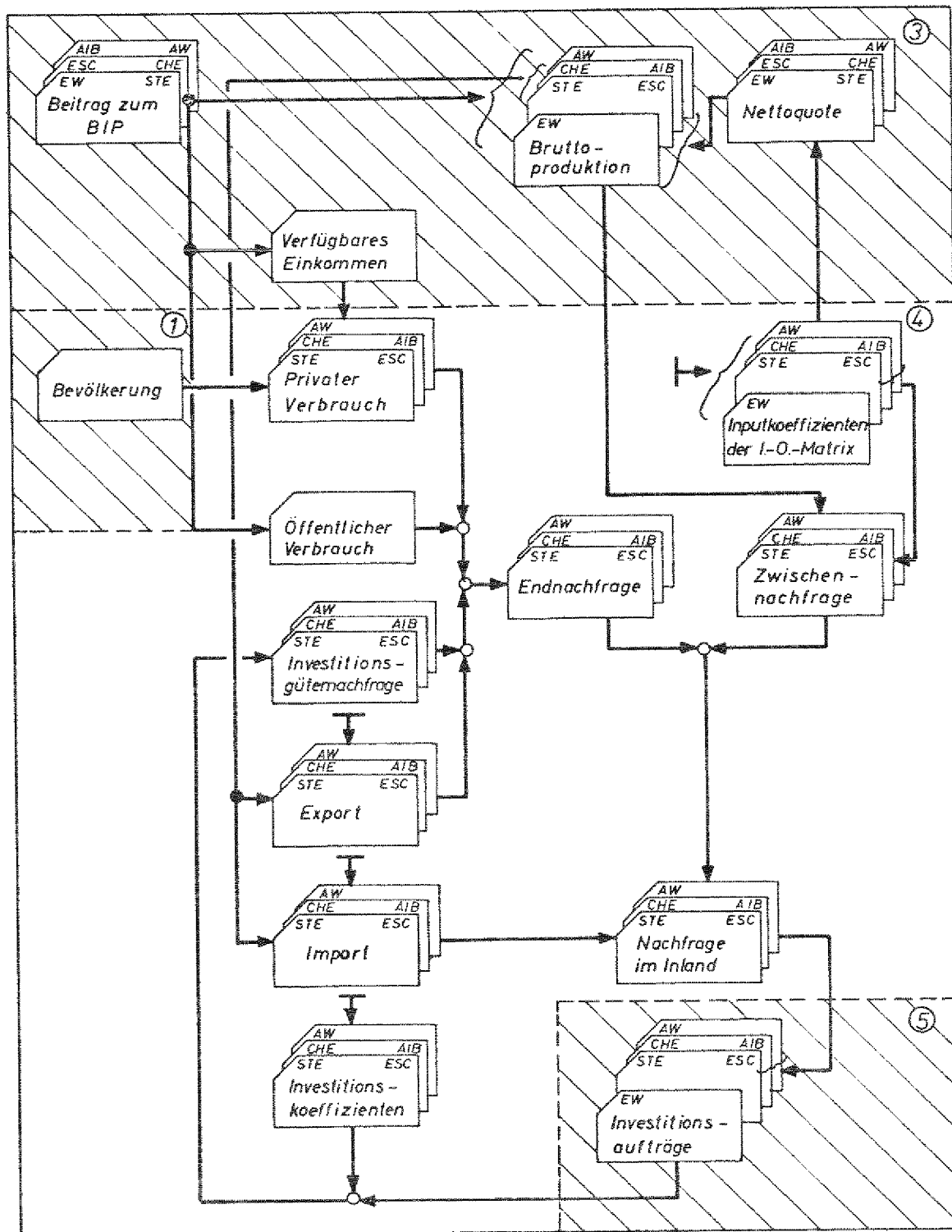


ABB. 39: Detailstruktur des Nachfragesektors (4)

Zur Darstellung der sektoralen Endnachfragekomponenten (privater Verbrauch, öffentlicher Verbrauch, Investitionsgüternachfrage und Export) werden folgende Beziehungen definiert: Die Nachfrage für den privaten Verbrauch wird durch eine Verbrauchsfunktion mit Hilfe des durchschnittlichen verfügbaren Einkommens pro Kopf der Bevölkerung ermittelt (Abb. 40). Dabei ist eine Verbrauchs-

struktur exogen vorgegeben, die an den Zeitreihen der Vergangenheit /83, 102/ verifiziert und extrapoliert wurde.

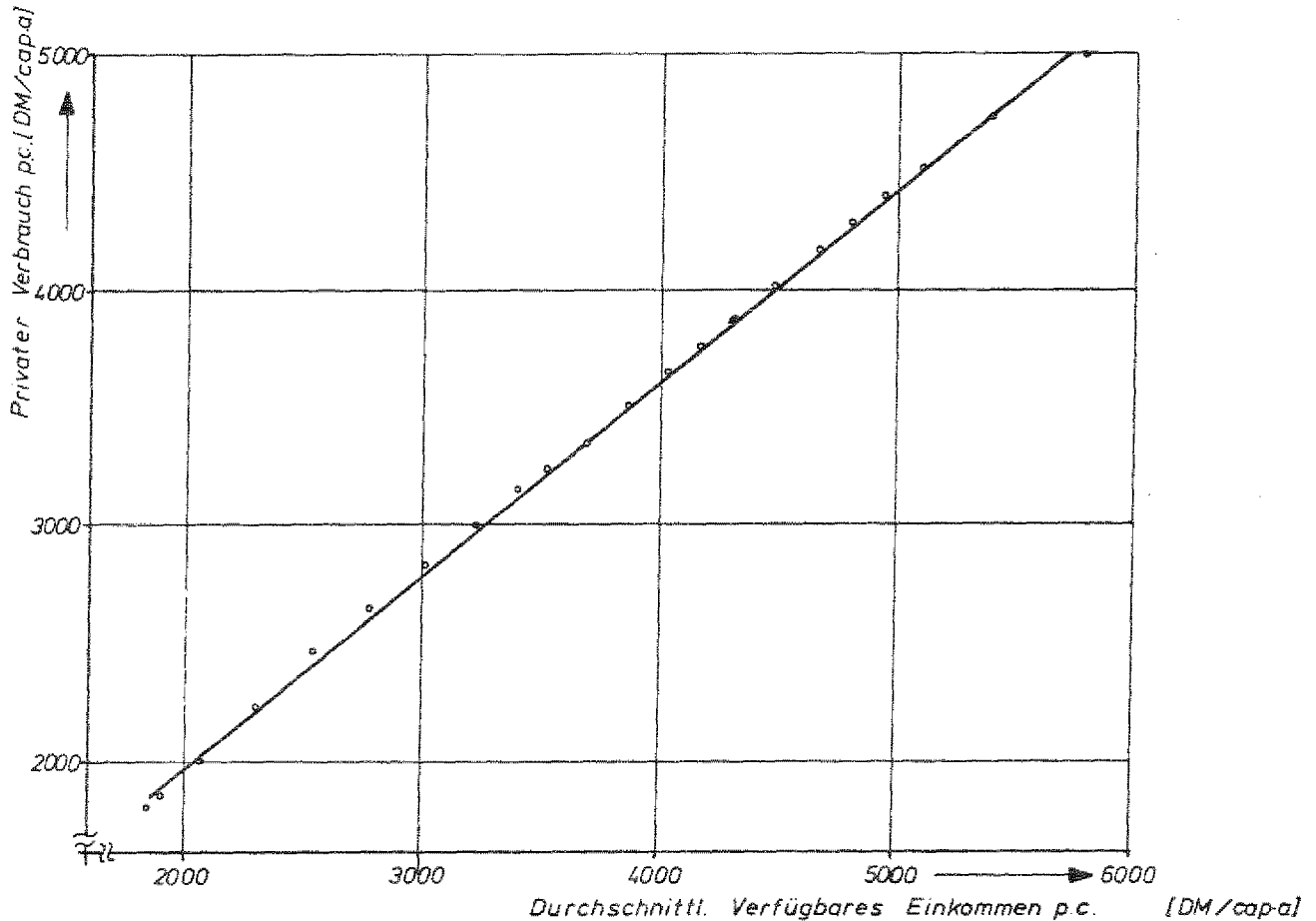


ABB. 40: Privater Verbrauch pro Kopf als Funktion des durchschnittlich verfügbaren Einkommens pro Kopf (in Preisen von 1962)

Zur Bestimmung der Nachfrage für den öffentlichen Verbrauch, also für den Konsum des Staates, der gemäß der sektoralen Abgrenzung nur Nachfrage nach Produkten des Sektors andere Wirtschaftsbereiche erzeugt, wird eine Nachfragefunktion mit dem Bruttoinlandsprodukt als erklärende Variable gewählt (Abb. 41). Dieser Beziehung liegt die Annahme zugrunde, daß der staatliche Konsum im Mittel durch ein bestimmtes Verhältnis von öffentlichen Ausgaben zum Steueraufkommen festgelegt ist, und daß sich das Steueraufkommen proportional zum Bruttoinlandsprodukt entwickelt.

Die Investitionsgüternachfrage entsteht nicht unmittelbar bei der Produktion - wie dies bei den Vorleistungen der Fall ist -, sondern sie stellt i.a. die langfristige Voraussetzung für die weitere Produktion mehrerer Perioden dar. Daher wird sie nicht der (kurzfristigen) Zwischennachfrage zugerechnet, sondern ist Bestandteil der Endnachfrage.

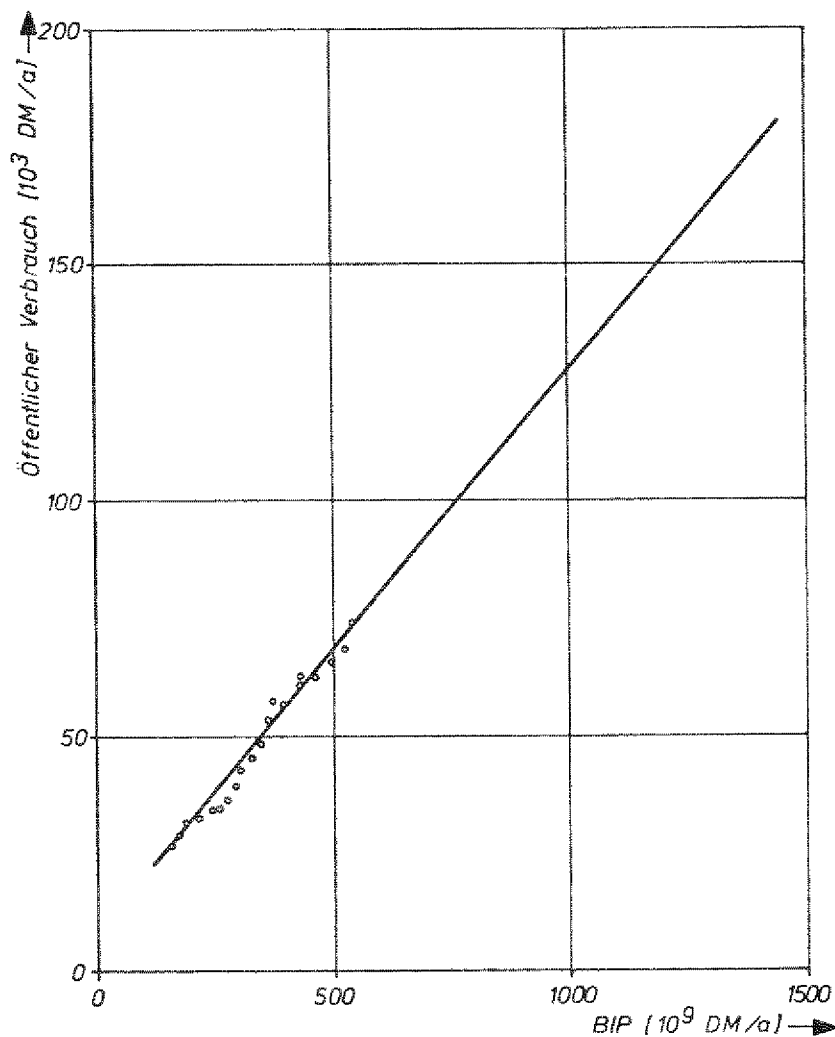


ABB. 41: Öffentlicher Verbrauch als Funktion des Bruttoinlandsproduktes (in Preisen von 1962).

Sind die von den Unternehmen erteilten Investitionsaufträge bekannt, so läßt sich über eine Matrix der Investitionsverflechtung, die aus /104/ auf Basis der Zahlen von 1962 für die sechs Wirtschaftsbereiche aggregiert wurde, die zugehörige, nach den Produzenten strukturierte Investitionsgüternachfrage angeben.

Als weitere Komponente der Endnachfrage ist die Nachfrage der übrigen Welt (Exportnachfrage) zu formulieren. Da die Exportbeziehungen nicht nur von der Angebotsstruktur der Produzenten im Inland, sondern ebenso von der Nachfragestruktur des Weltmarktes und von den entsprechenden Wettbewerbsbedingungen abhängen, wurde hier - für das Energiemodell der BFD - darauf verzichtet, die Auslandsnachfrage mit einem dazu erforderlichen Weltmarktmodell endogen zu bestimmen. Der Export wird stattdessen durch exogen vorgegebene, auf die durchschnittliche Bruttoproduktion bezogene Exportquoten festgelegt. Die Be-

stimmung der produktionsbedingten Nachfrage, also der Zwischennachfrage der Unternehmen, erfolgt mit Hilfe der Input-Koeffizienten einer aus /102, 103/ aggregierten Input-Output-Tabelle (Tab. 18). Dabei geben die in Preisen von 1962 berechneten Inputkoeffizienten a_{ij} an, welchen Anteil die Bezüge des Sektors j vom Produktionssektor i (x_{ij}) am Volumen der Bruttoproduktion (bzw. der Nachfrage) des Sektors j (x_j) haben. Sie kennzeichnen also die Struktur der Spaltenwerte der Input-Output-Tabelle:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j}$$

Unterstellt man konstante Inputkoeffizienten, wie dies z.B. im offenen statischen Leontief-Modellansatz geschieht /102/, so läßt sich mit Hilfe der a_{ij} -Matrix angeben, wieviel der Sektor i unter Status-quo-Bedingungen produzieren muß, damit eine Einheit Endnachfrage nach Produkten des Sektors j befriedigt werden kann. Dieser statische Ansatz kann also zur Darstellung der Produktionsstruktur eines bestimmten Zeitpunktes dienen, für eine Aussage über die zeitliche Entwicklung im Produktionsbereich ist jedoch eine dynamische Erklärung erforderlich. Denn die Koeffizienten einer Input-Output-Matrix geben die Struktur und die Technologie der Volkswirtschaft während der untersuchten Periode wieder; strukturelle und technologische Änderungen haben daher i.a. eine Veränderung der Koeffizientenmatrix zur Folge. Da bei längerfristigen Untersuchungen nicht mit einer Konstanz der Koeffizienten zu rechnen ist, muß eine Dynamisierung der Beziehungen versucht werden.

Um Veränderungen in der Koeffizientenstruktur messen zu können, müssen mehrere Input-Output-Tabellen gleichen Aufbaus und mit ausreichender zeitlicher Distanz vorhanden sein. Aus dem vorliegenden Zahlenmaterial /102, 103/ für die Jahre 1950, 1954, 1958, 1962, 1966 lassen sich andeutungsweise Trends für die Input-Koeffizienten erkennen und so extrapolieren, daß die Gefahr vermindert wird, die Erklärung der Zwischennachfrage aus der erwarteten Endnachfrage auf nicht mehr gültige strukturelle und technologische Zusammenhänge abstützen zu müssen. Dabei ist diese Vorgehensweise natürlich mit allen Vorbehalten behaftet, die bei jeder auf Trendfortschreibung beruhenden Prognose zutreffen. Problematisch ist insbesondere die Wahl der geeigneten Trendfunktionen und entsprechender Sättigungsniveaus. Außerdem ist davon auszugehen, daß sich wegen der multisektoralen Verflechtung die Koeffizienten gegenseitig beeinflussen. Trotzdem führen solche Extrapolationen offenbar zu besseren Ergebnissen, als

von an		Energiew.	Steine/Erden	Eisenschaff. I.	Chem. Ind.	Andere I.B.	Industrie	Andere W.B.	Zwischennachfr.	Privater Verbr.	Staatsverbr.	Anlageinvest.	Vorratsinvest.	Ausland (Export)	Endnachfrage	Bruttoprod.
		EW	STE	ESC	CHE	AIB	IN	AW	ZF	PV	SV	XV	VO	EX	EF	BP
Energiewirtschaft	EW	11,7	1,1	2,2	2,6	6,4	12,3	12,0	36,0	12,4	-	1,6	+0,4	3,6	18,0	54,0
Steine/Erden	STE	0,2	1,2	0,4	0,3	0,5	2,4	7,6	10,2	0,2	-	0,5	+0,1	0,5	1,3	11,5
Eisenschaffende Industrie	ESC	0,3	0,1	4,0	0,3	10,1	14,5	2,5	17,3	0,2	-	0,4	+0,2	5,0	5,4	22,7
Chemische Industrie	CHE	0,7	0,1	0,1	8,3	8,6	17,1	6,6	24,4	4,4	-	0,6	+0,3	11,9	17,2	41,6
Andere Industriebetriebe	AIB	3,3	0,8	1,6	3,4	76,4	82,2	48,9	133,4	76,3	-	36,5	+1,1	52,4	166,3	299,7
Industrie	IN	4,5	2,2	6,1	12,3	95,6	116,2	65,6	185,3	81,1	-	38,0	+1,3	69,8	190,2	375,5
Andere W.B.	AW	4,6	2,0	2,1	5,8	39,2	49,1	116,0	169,7	140,2	60,8	69,7	+1,6	15,2	287,4	457,1
Inl. Vorleist.	IL	20,8	5,3	10,4	20,7	141,2	177,6	192,6	391,0	233,7	60,8	109,3	+3,3	88,5	495,6	886,6
Ausland (Import)	IM	5,8	0,2	2,6	3,9	29,5	36,2	15,8	57,8	18,4	-	5,0	-	4,5	27,9	85,7
Ges. Vorleist.	VL	26,6	5,5	13,0	24,6	170,7	213,8	208,4	448,8	252,1	60,8	114,3	+3,3	93,0	523,5	972,3
Beitr. z. BIP	NP	27,4	6,0	9,7	17,0	129,0	161,7	248,7	437,8	-	-	-	-	÷ 1,3	÷ 1,3	436,5
Bruttoprod.	BP	54,0	11,5	22,7	41,6	299,7	375,5	457,1	886,6	252,1	60,8	114,3	+3,3	91,7	522,2	1408,8

TAB. 18: Input-Output-Rechnung für die BRD 1966, Vorleistungsverflechtung in 10^9 DM, in Preisen von 1962, nach /102, 103/.

sie unter der einfachen Hypothese konstanter Koeffizientenstrukturen in den Sektoren zu erwarten ist, wie in /90/ näher dargelegt wird.

In dem hier beschriebenen Modellansatz für die BRD werden daher Annahmen über den Verlauf der Trendfunktionen getroffen, wobei von einer andeutungsweise erkennbaren Sättigung bis zum Jahre 2000 ausgegangen wurde. Da zwischen der Steigerung der Endnachfrage und der dadurch ausgelösten produktionsbedingten Vergrößerung der Nachfrage nach Vorleistungen i.a. eine Verzögerung eintritt, bis die zusätzliche Nachfrage in allen Produktionssektoren wirksam wird, wurde die Zwischennachfrage als Funktion des Outputs bzw. der Bruttoproduktion der Vorperiode gemessen.

Ein Teil der gesamten Nachfrage wird abhängig von den Marktverhältnissen durch Einfuhren gedeckt werden. Daher wurden, ähnlich wie beim Export, exogen vorgegebene, auf die durchschnittliche Bruttoproduktion bezogene sektorale Importquoten zur Festlegung der Importe definiert und die Nachfrage im Inland um diese Einfuhranteile vermindert.

Ausgehend von der Nachfrageentwicklung im Inland kann nun eine Beziehung für die Investitionsentscheidungen der Unternehmen gefunden werden, wobei unterstellt wird, daß andere Faktoren, wie z.B. die Gewinnerwartung oder die Finanzierungsmöglichkeiten keine andauernden gegenteiligen Wirkungen auf die Dispositionen der Unternehmen ausüben. Diese Einschränkung kann deshalb eingeführt werden, weil es darum geht, das langfristige Wachstumsverhalten darzustellen; kurzfristige unternehmens- und finanzpolitische Auswirkungen können daher in erster Näherung unberücksichtigt bleiben, zumal da sie in der Regel ohnehin nur eine Folge von konjunkturell bedingten Anpassungsvorgängen sind. Es ist jedoch zu erwarten, daß auf längere Sicht wirtschaftspolitische Maßnahmen wirksam werden, die das Wachstumsverhalten einer freien Marktwirtschaft durch eine instrumentale Steuerung tendenziell beeinflussen werden. Diese Globalsteuerung der Wirtschaft durch die Organe des Staates wird mit Hilfe von exogen vorgegebenen Koeffizienten, die das Investitionsverhalten im Sinne eines angestrebten gesamtwirtschaftlichen Wachstums beeinflussen, berücksichtigt. Klammert man zunächst die exogenen Einflußfaktoren aus (siehe hierzu Abschnitt 4), so lassen sich die unternehmerischen Investitionsentscheidungen in Abhängigkeit von der Nachfrageentwicklung wie folgt simulieren (Abb. 42).

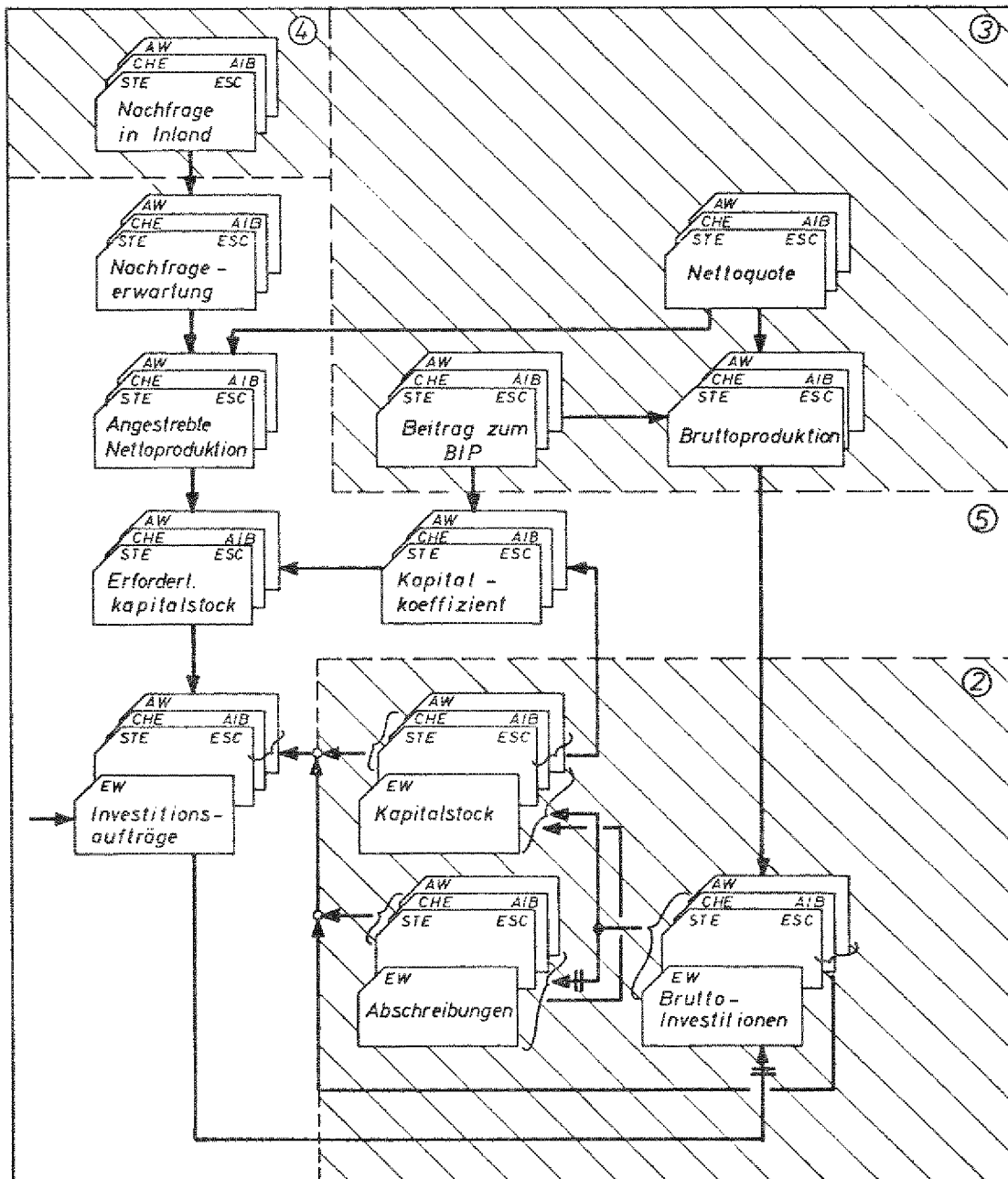


ABB. 42: Detailstruktur des Investitionssektors (5)

Da kurzfristige Nachfrageänderungen keine sehr große Bedeutung für die Investitionsentscheidungen der Unternehmen haben /74/, wird zunächst die durchschnittliche Nachfrageerwartung aus den Zeitreihen der Vergangenheit ermittelt. Mit Hilfe der Nettoquote, die ein Maß für den Anteil der Vorleistungen an der Produktion ist, läßt sich nun die angestrebte Nettoproduktion errechnen. Die Unternehmen müssen für die Verwirklichung dieser Produktion Produktionsfaktoren einsetzen, wobei die Höhe des Faktorinputs von der Faktorpro-

duktivität bestimmt wird. Da die Substitution zwischen den Faktoren Arbeit und Kapital durch einen dynamischen Austauschmechanismus im Beschäftigungssektor beschrieben wird, kann an dieser Stelle eine Produktivitätskennzahl, die Kapitalproduktivität, zur Festlegung des erforderlichen Faktoreinsatzes verwendet werden; die Arbeitsproduktivität ist folglich über die Kapitalintensität implizit bestimmt.

Mit Hilfe des Kapitalkoeffizienten (Reziprokwert der Kapitalproduktivität), dem Quotienten aus Kapitalstock und Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt (bzw. Nettoproduktion) läßt sich ausrechnen, wieviele Einheiten Kapital bei derzeitigen Produktivitätsbedingungen für eine Einheit Nettoproduktion erforderlich sind. Berücksichtigt man ferner, daß sich der erforderliche Kapitalstock bis zur Fertigstellung der in Auftrag gegebenen Investitionen um Abschreibungen vermindert und durch die Auslieferung von Investitionsgütern, die bereits vorher in Auftrag gegeben wurden, vermehrt, so ergibt sich aus der Differenz, wieviel Investitionsaufträge zusätzlich vergeben werden müssen, um die angestrebte Nettoproduktion realisieren zu können. Eine wesentliche Rolle für das dynamische Verhalten im Investitionssektor spielen dabei die Verzögerungszeiten zwischen Auftragsvergabe und Fertigstellung von Investitionsgütern. Denn einerseits greifen die Investitionsaufträge als Bestandteil der Endnachfrage der nächsten Periode in den nachfrageseitig bestimmten Wachstumsprozeß ein, zum anderen sind die Produktionszeiten von Investitionsgütern für die Reaktionsgeschwindigkeiten der Produktion auf Nachfrageänderungen maßgebend. Da jedoch das vorhandene statistische Material keine Erklärung unterschiedlicher Produktionszeiten zuläßt, wenn nicht nach einzelnen Investitionsobjekten differenziert wird, ist hier eine fiktive Verzögerungszeit eingeführt worden. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Unternehmen in der Regel kontinuierlich eine einjährige Investitionsrechnung anstellen, und daß sich die Investitionsentscheidungen bei einer nicht objektdifferenzierten Betrachtung auch durch kontinuierlich ablaufende Ein-Jahres-Berechnungen in jeder Periode simulieren lassen.

Mit den beschriebenen Verfahrensschritten sind die Brutto-Investitionen in jedem Sektor mit Ausnahme der Energiewirtschaft (siehe Abschnitt 3.3.4) berechnet und anhand der Zeitreihen aus /76, 82, 83, 84, 88, 89/ für die Jahre von 1950 bis 1971 verifiziert worden. Das Ergebnis für die Gesamtwirtschaft zeigt die Abb. 43.

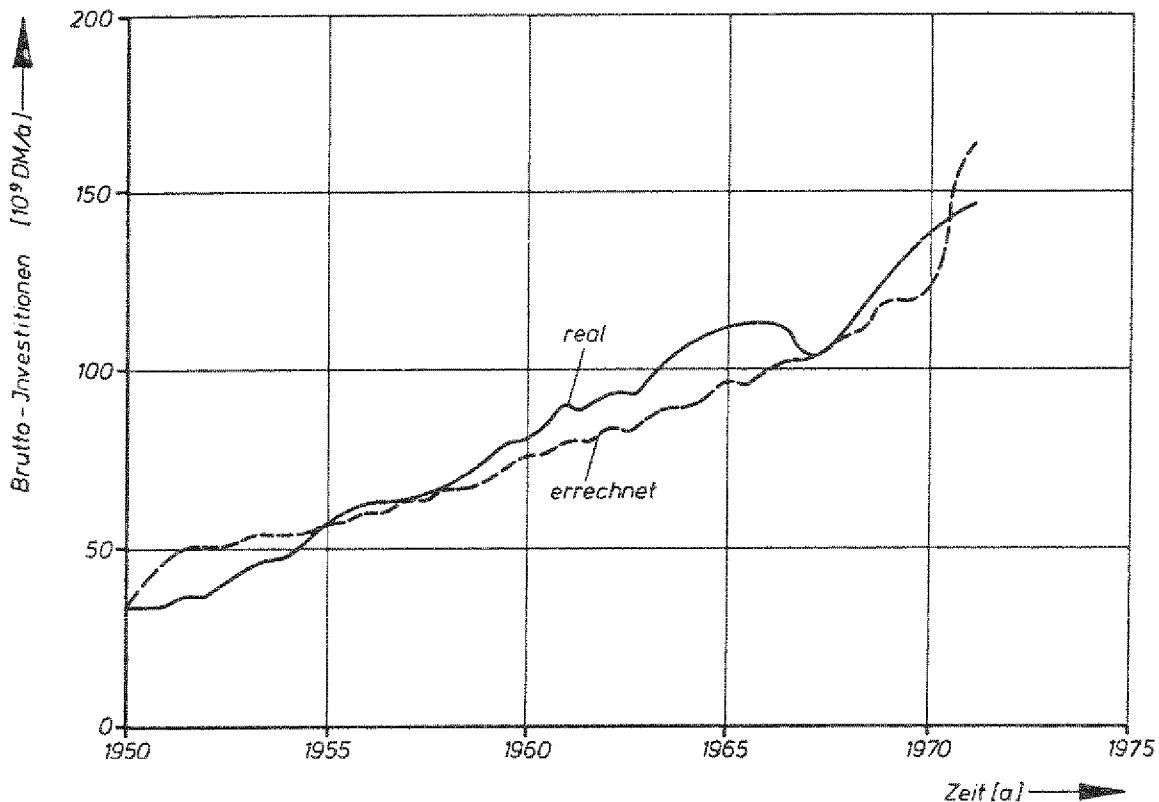


ABB. 43: Zur Verifizierung der Modellstruktur:
reale und errechnete Entwicklung der Brutto-Investitionen

3.3.3 Energieverbrauchssektor

In diesem Sektor sind die in der Industrie, in den Haushalten, bei den Kleinverbrauchern und im Verkehr verbrauchten Energiemengen zu bestimmen. Dabei wird in der Industrie nach den Sektoren Industrie der Steine und Erden, Eisenschaffende Industrie, Chemische Industrie sowie Andere industrielle Bereiche und nach dem nichtenergetischen Verbrauch unterschieden, bei den Haushalten wird eine Trennung nach den Verwendungszwecken Raumheizung und übrige Energieverbrauchszwecke vorgenommen, und im Verkehr wird der Energieverbrauch den einzelnen Verkehrsträgern zugeordnet. Aus Gründen der Verwendbarkeit eines Zahlenmaterials, das von der Abgrenzung nach Sektoren und Energieträgern homogen ist, wird in allen Bereichen vom Endenergieverbrauch bzw. vom nichtenergetischen Verbrauch ausgegangen, lediglich bei der Ermittlung des Energieverbrauchs für die Raumheizung der privaten Haushalte erfolgt die Verbrauchsberechnung mit Hilfe der Nutzenergie.

Die wichtigste ökonomische Bestimmungsgröße des Energieverbrauchs in den privaten Haushalten ist das durchschnittlich verfügbare Einkommen pro Kopf der Bevölkerung. Diese Geldgröße kann als Maß für den Lebensstandard des einzelnen angesehen werden, aus dem sich das Konsumverhalten und folglich auch die Energienachfrage - soweit ökonomisch erklärbar - ableiten lassen. Da die Nachfrage nach dem Komplementärgut Energie sehr eng mit einer bestimmten quantitativen und qualitativen Ausstattung der privaten Haushalte mit energieverbrauchenden Anlagen oder Geräten verknüpft ist, hängt die Erklärbarkeit des Energieverbrauchs mit Hilfe des durchschnittlich verfügbaren Einkommens davon ab, inwieweit die für die Energienutzung erforderlichen apparativen Voraussetzungen ökonomisch bestimmt werden können, bzw. inwieweit zusätzlich außerökonomische Faktoren, wie z.B. Lebensgewohnheiten oder nichtrationale Verhaltensweisen eine Rolle spielen. An dieser Stelle sollen jedoch außerökonomische Faktoren, die die Anlagen- und Gerätestruktur und somit den Energieverbrauch beeinflussen können, unberücksichtigt bleiben.

Die privaten Haushalte setzen Energie einerseits zu Raumheizwärmezwecken (derzeit ca. 85 %) ein, zum anderen wird Energie für die Bereitstellung von Licht, Kraft, Warmwasser und Kleinwärme (übrige Energieverbrauchszwecke - derzeit etwa 15 %) verbraucht. Die Elastizität des Energieverbrauchs in bezug auf die Einkommen ist für die einzelnen Verwendungszwecke unterschiedlich, daher ist es erforderlich, für die Berechnung des Energiebedarfs eine Trennung nach Einsatzbereichen vorzunehmen (Abb. 44).

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, daß die vorhandene Wohnungsfläche eng mit dem durchschnittlich verfügbaren Einkommen korreliert ist /105/. Geht man davon aus, daß die Entwicklung der Wohnungsfläche, die pro Kopf der Bevölkerung zur Verfügung steht, bei weiterer Einkommenssteigerung durch eine Sättigungstendenz gekennzeichnet ist (Abb. 45), so läßt sich mit Hilfe der Einkommensentwicklung die Veränderung der Wohnungsflächen endogen bestimmen. Der für die Raumheizung erforderliche Energieeinsatz kann dann über die Wohnungsfläche und den spezifischen Wärmebedarf je Flächeneinheit errechnet werden.

Da jedoch für die Raumheizwärmeerzeugung nicht nur verschiedene Energieträger zur Verfügung stehen, sondern auch unterschiedliche Beheizungssysteme mit

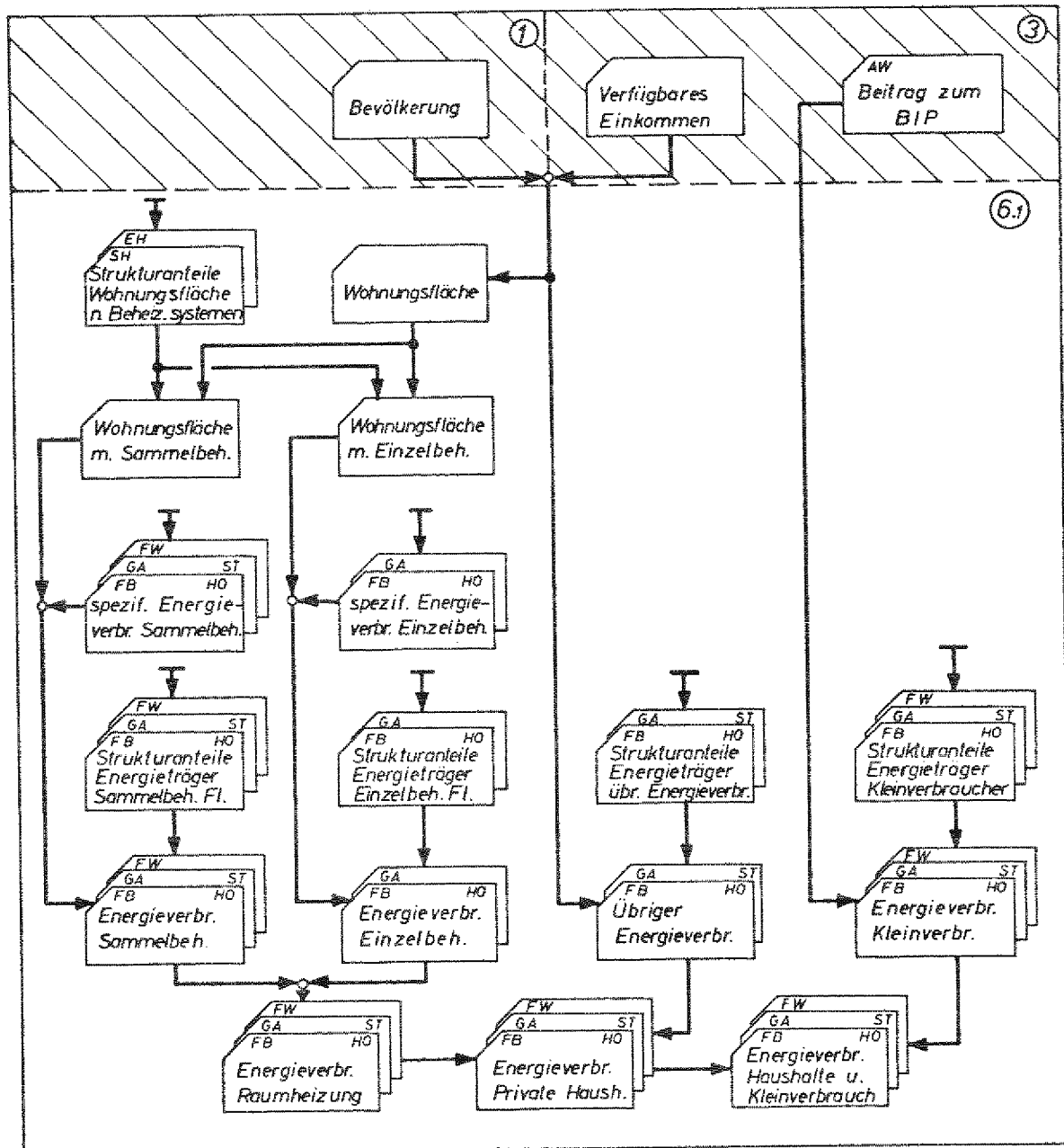


ABB. 44: Detailstruktur des Subsektors Energieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher (6.1) im Energieverbrauchssektor.

verschiedenen Auslegungs- und Auslastungsmerkmalen verwendet werden, erscheint es sinnvoll, in Anlehnung an /105/ folgende Aufteilung des Raumheizungsbereichs vorzunehmen:

Beheizungssystem

Sammelheizung

Energieträger

Feste Brennstoffe (Steinkohle, Braunkohle, Koks, Briketts, Holz u.a.)

Heizöl

Gas

Strom

Fernwärme

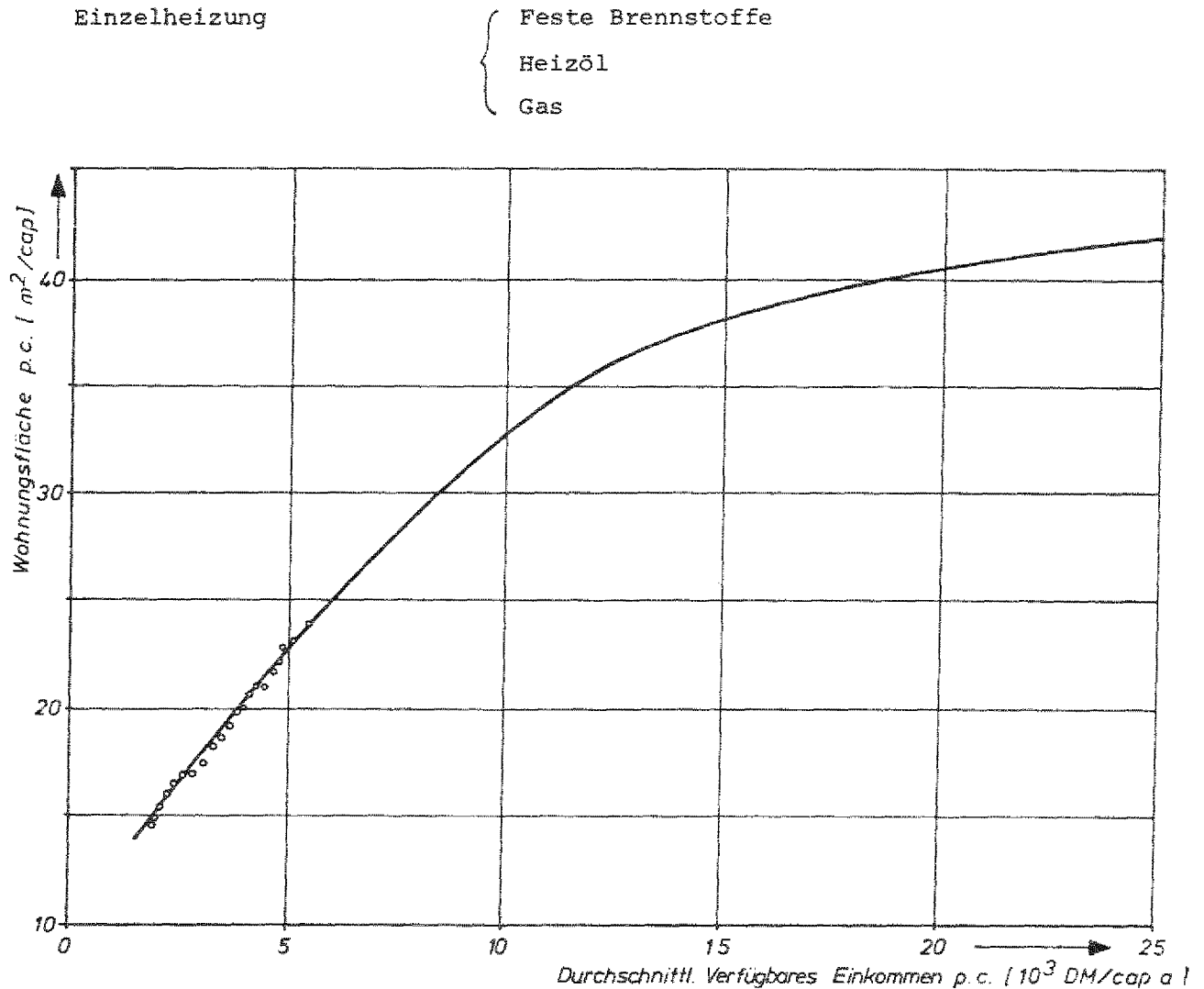


ABB. 45: Wohnungsfläche pro Kopf als Funktion des durchschnittlich verfügbaren Einkommens pro Kopf (in Preisen von 1962)

Die Aufteilung der Wohnungsflächen nach Beheizungssystemen und Energieträgern erfolgt durch exogen vorgegebene Strukturanteile. Dabei werden für die Darstellung der Entwicklung in der Vergangenheit Zeitreihen verwendet, die Angaben in /38, 105, 106, 107, 108/ entnommen sind. Für die Festlegung der zukünftigen Struktur wird bei den Beheizungssystemen eine auf Schätzungen von /108/ abgestützte und erweiterte Prognose herangezogen, wobei vorausgesetzt ist, daß der Sammelheizungsanteil am Neubauvolumen (entsprechend dem derzeitigen Anteil) etwa 99 % beträgt (Abb. 46).

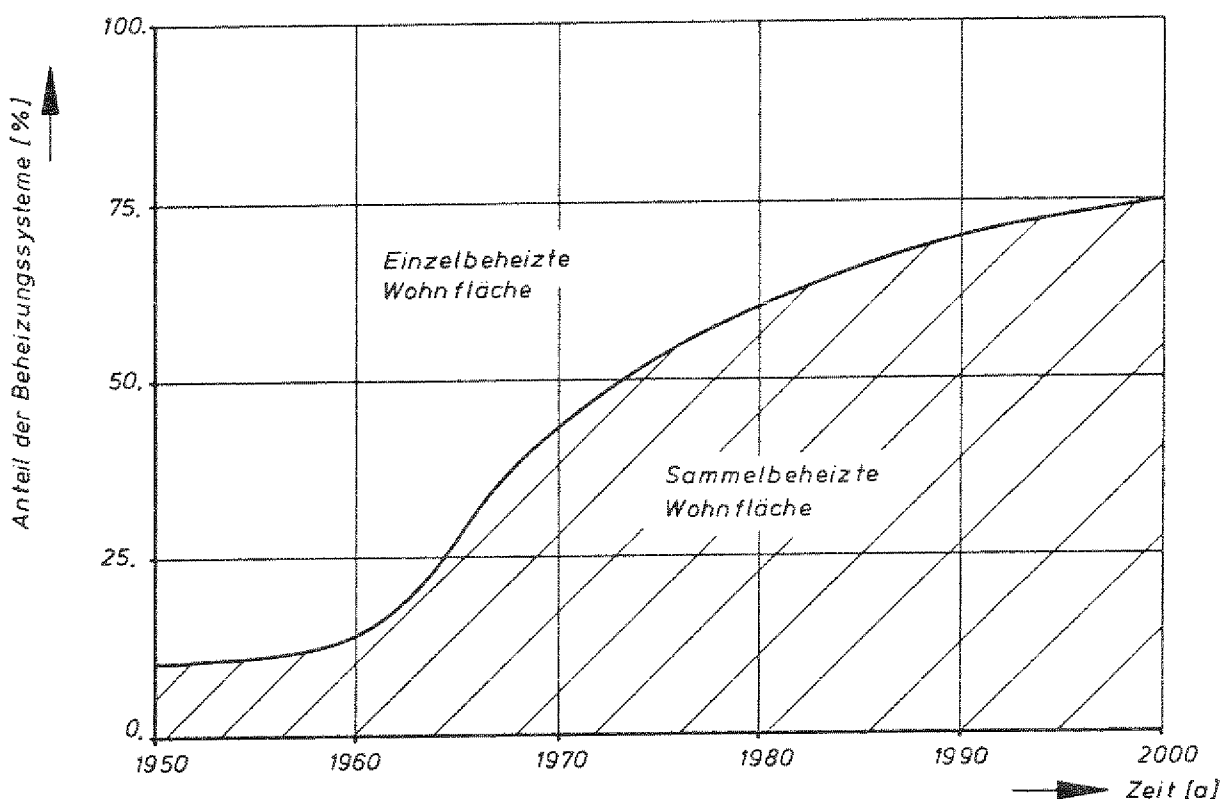


ABB. 46: Anteile der sammel- und einzelbeheizten Wohnungsflächen

Für die Aufteilung der sammel- und einzelbeheizten Wohnungsflächen nach den in der Zukunft eingesetzten Energieträgern wurden alternative Annahmen getroffen, auf die im Zusammenhang mit der Darstellung der Strategierechnungen (siehe Abschnitt 4) näher eingegangen wird. Die vergangene Entwicklung gibt die Tab. 19 wieder.

	Sammelbeheizte Wohnungsfläche					Einzelbeheizte Wohnungsfläche		
	Feste Brennstoffe	Heizöl	Gas	Strom	Fernwärme	Feste Brennstoffe	Heizöl	Gas
1950	90,2	0,2	4,5	1,2	3,9	99,6	0,2	0,2
1955	88,0	1,9	3,7	1,2	5,2	98,4	0,9	0,7
1960	65,0	27,2	0,5	1,0	6,3	92,3	6,1	1,6
1965	43,6	43,7	4,9	1,1	6,7	75,4	20,4	4,2
1970	31,8	45,2	10,2	2,8	10,0	63,9	30,3	6,7

TAB. 19: Aufteilung der sammel- und einzelbeheizten Wohnungsflächen nach Energieträgern in (%)

Zahlenangaben für den spezifischen temperaturbereinigten Energieverbrauch der verschiedenen Beheizungssysteme und Energieträger sind /109/ entnommen worden. Dabei sind ausgehend vom derzeitigen mittleren Jahreswärmebedarf pro Flächeneinheit spezifische Größen für den Endenergieverbrauch der einzelnen Beheizungsarten definiert worden, die sich in Abhängigkeit vom Isolierungs-

zustand der Wohnungen und von der Anlagenbetriebsweise verschieben lassen. Die durch eine Verbesserung der Isolierung erzielbaren Einsparungen werden in Abschnitt 4 gesondert untersucht, an dieser Stelle der Modellkonzeption wird zunächst vom derzeitigen Stand der Wärmedämmung ausgegangen. Die durch technischen Fortschritt in den Feuerungsanlagen bedingten Einsparungen im Energieverbrauch sind in der Vergangenheit gering gewesen, und auch in der Zukunft werden kaum nennenswerte Leistungssteigerungen der Gerätewirkungsgrade erwartet /105/. Jedoch läßt sich aus der Vergangenheit eine tendenzielle Zunahme des spezifischen Energieverbrauchs aufgrund einer veränderten Betriebsweise mit längeren Betriebszeiten und niedrigeren Auslöseschwellen der Feuerungsanlagen erkennen. Beide Einflüsse, die Veränderung der Gerätewirkungsgrade und der Betriebsweisen, werden bei der quantitativen Festlegung des spezifischen Energieverbrauchs durch einen Lastfaktor berücksichtigt, wobei unterstellt wird, daß die in /105/ angegebene steigende Tendenz bis zum Jahr 2000 durch eine vollkommene Sättigung gekennzeichnet ist.

Der Energieverbrauch der privaten Haushalte für übrige Zwecke läßt sich unmittelbar mit dem durchschnittlich verfügbaren Einkommen erklären, wenn man von der Vorstellung ausgeht, daß sich infolge einer Änderung des Einkommens auch die Zahl und/oder die Art der eingesetzten Geräte verändert, die für die Bereitstellung von Licht, Kraft, Warmwasser und Kleinwärme Energie verbrauchen /120/ (Abb. 47). Die Aufteilung auf die zur Verfügung stehenden Energieträger (feste Brennstoffe, Heizöl, Gas, Strom) erfolgt ähnlich wie bei der Raumheizung durch exogen vorgegebene Strukturanteile, wobei Zahlenangaben für die Vergangenheit /105, 107, 120 und 101/ entnommen worden sind. Für die zukünftige Entwicklung wurde bis zum Jahre 2000 eine Zunahme des Stromanteils auf 80 % an der Gesamtsumme des übrigen Energieverbrauchs unterstellt. Gleichzeitig verringert sich der Anteil der anderen Energieträger entsprechend; dieser Strukturwandel läßt sich tendenzmäßig unmittelbar aus der Vergangenheit ableiten.

Die Gruppe der Kleinverbraucher, die in der Energiestatistik aus Gründen der Erhebung vielfach zusammen mit den privaten Haushalten erfaßt wird, kennzeichnet einen Energieverbrauchsbereich, der seiner Zusammensetzung nach sehr inhomogen ist. Zu ihr gehören (nach /7/):

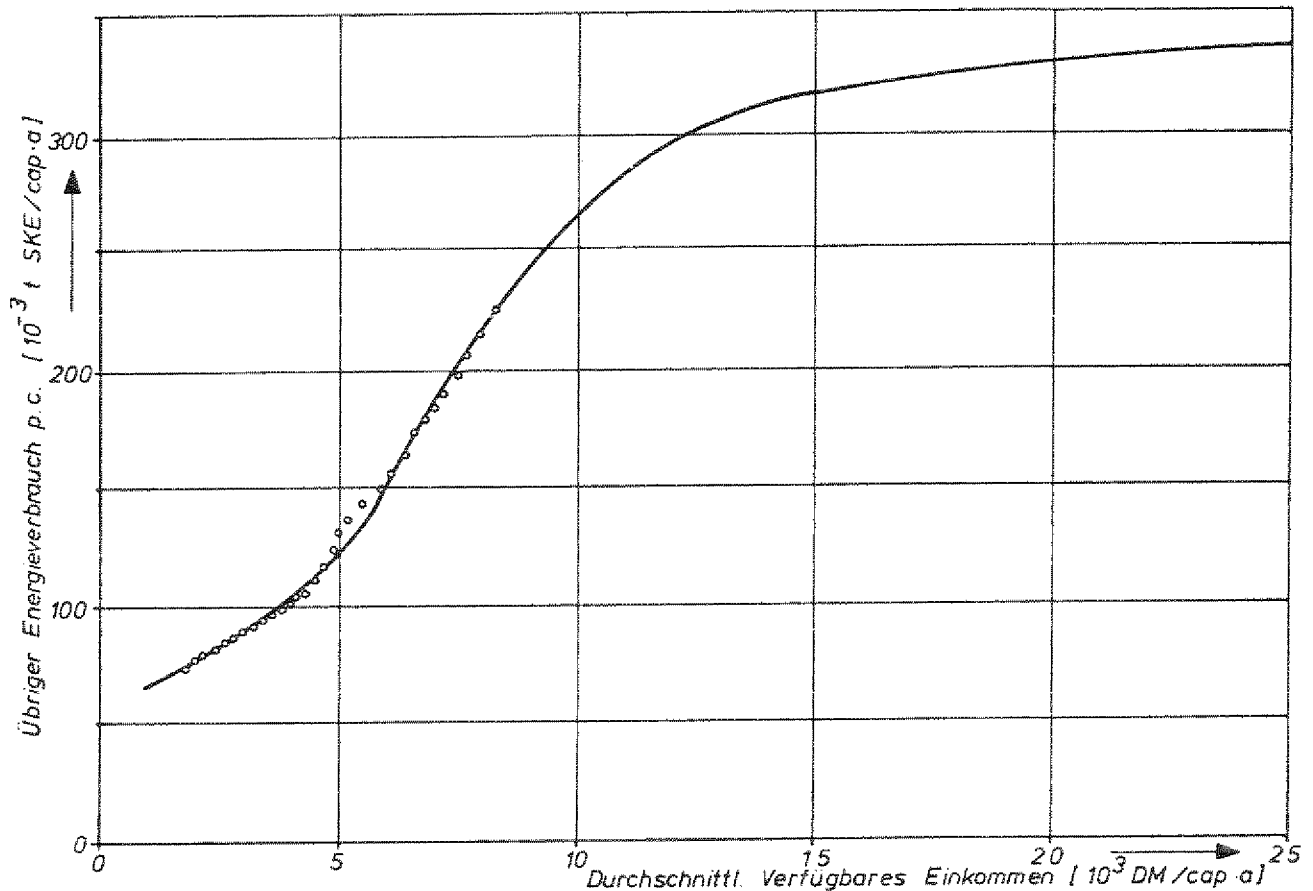


ABB. 47: Übriger Energieverbrauch pro Kopf als Funktion des durchschnittlich verfügbaren Einkommens pro Kopf (in Preisen von 1962).

- Anstaltshaushalte
- Öffentliche Einrichtungen (Schulen, Theater, Ämter etc.)
- Wasserwerke
- Gewerbebetriebe einschl. der industriellen Betriebe mit weniger als 10 Beschäftigten
- Wäschereien und chemische Reinigung
- Bauhauptgewerbe
- Handwerksbetriebe
- Geschäftsgebäude und Räume gewerblicher Art
- Handelsunternehmen
- Landwirtschaft

Zusätzlich werden dieser Gruppe für die vorliegende Untersuchung die Militärischen Dienststellen zugeordnet. Ein Vergleich mit der Abgrenzung nach den Wirtschaftsgruppen, die in 3.1 vereinbart wurde, ergibt, daß der Sektor andere Wirtschaftsbereiche, der sämtliche Dienstleistungsbereiche, die Kleinindustrie,

Baugewerbe, Handwerk, Handel, Landwirtschaft und Staatliche Bereiche enthält, von der Zusammensetzung her nahezu identisch mit der Gruppe Kleinverbraucher ist.

Da der Energieverbrauch der Kleinverbraucher nur als Restgröße aus der zusammengefaßten Gruppe Haushalte und Kleinverbraucher ermittelt werden kann, wenn nicht eigene Erhebungen angestellt werden, bestehen hinsichtlich des vorliegenden Zahlenmaterials eine Reihe von Unsicherheiten. Wegen dieser Schwierigkeiten in der empirischen Ableitung des Energieverbrauchs und wegen der starken Inhomogenität des

gesamten Sektors, in dem strukturelle Veränderungen nicht sichtbar werden, wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung davon ausgegangen, daß sich die Energieverbrauchsentwicklung der Gruppe Kleinverbraucher durch die Veränderung des Produktionsvolumens des Sektors Andere Wirtschaftsbereiche hinreichend genau beschreiben läßt. Der hierbei zugrundegelegte Regressionsansatz wird in Abb. 48 wiedergegeben. Für die strukturelle Aufteilung des Energieverbrauchs nach Energieträgern wird dabei wie in der Verbrauchsgruppe private Haushalte verfahren.

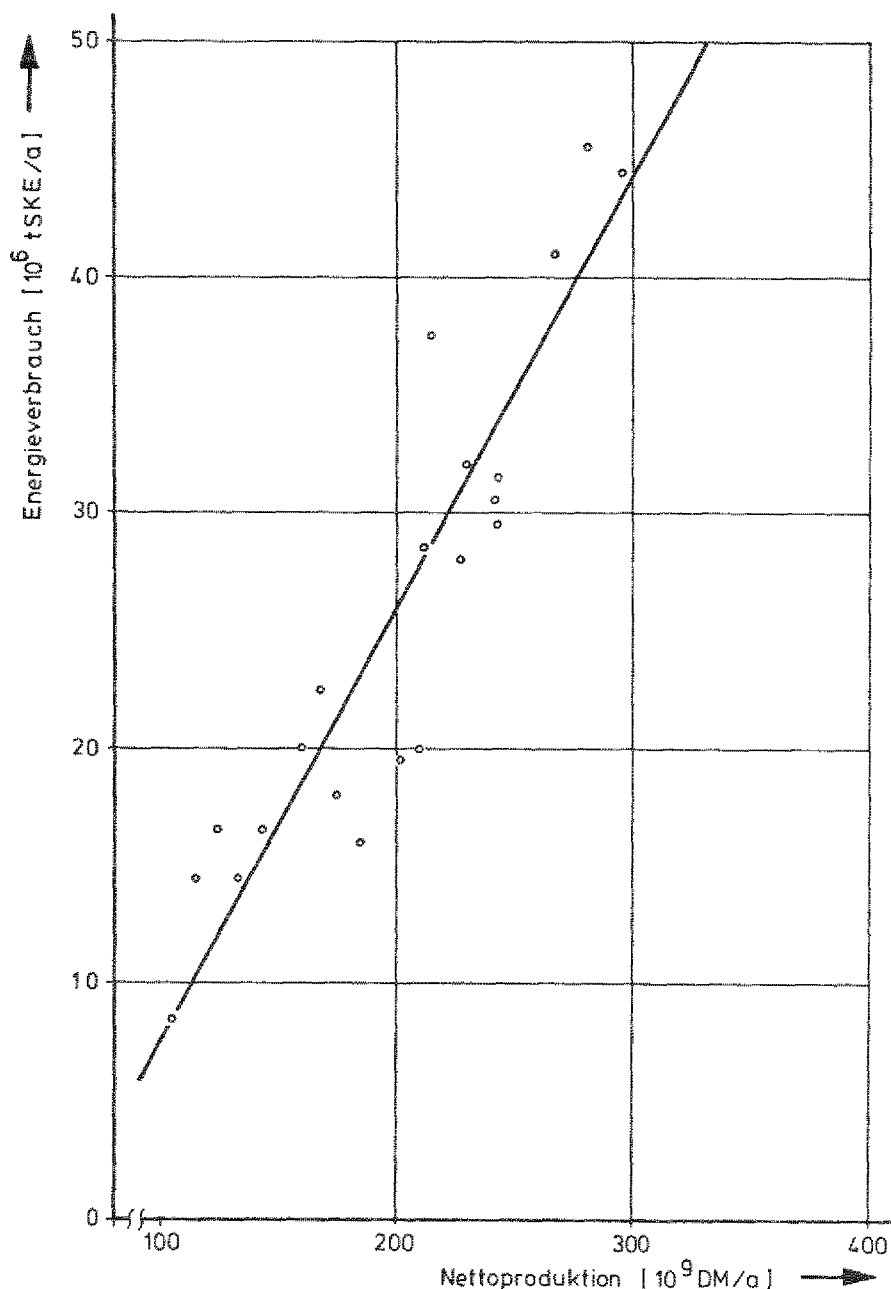


ABB. 48: Energieverbrauch der Gruppe Kleinverbraucher als Funktion der Nettoproduktion des Sektors Andere Wirtschaftsbereiche (in Preisen von 1962).

Will man den Energieverbrauch im Verkehr bestimmen, so ist zunächst nach den Determinanten für die Verkehrsentwicklung zu fragen. Dabei lassen sich ausgehend von den beiden Verkehrsbereichen, Personen- und Güterverkehr, verschiedene Verkehrssysteme unterscheiden, denen einzelnen Verkehrsträger zugeordnet werden können.

Für die Entwicklung der Verkehrsleistung im Personenverkehrsbereich, bei dem schienen-, luft- und straßengebundene Systeme Verwendung finden⁽¹⁾, lassen sich verschiedene erklärende Größen angeben /116/. Es hat sich jedoch in der Vergangenheit erwiesen, daß die Veränderung der Verkehrsleistung letztlich sehr stark von der Entwicklung des durchschnittlich verfügbaren Einkommens geprägt ist. Dabei zeichnet sich, wie der Funktionszusammenhang in Abb. 49 wiedergibt, nach einer anfänglich steigenden Tendenz in zunehmendem Maße eine Sättigung in der Entwicklung ab. Für die Zunahme des PKW-Bestandes pro Kopf der Bevölkerung lassen sich grundsätzlich die gleichen Gründe anführen, die auch für die Veränderung der gesamten Personen-Verkehrsleistung pro Kopf der Bevölkerung gelten, zumal da der Anteil des Individualverkehrs am Verkehrsaufkommen derzeit etwa 79 % beträgt. Daher kann der für die zukünftige Entwicklung maßgebende Zusammenhang zwischen Verkehrsleistung und Einkommen zusätzlich auf eine vorliegende Prognose des PKW-Bestandes /111/ abgestützt werden. Voraussetzung für die Parallelität der Entwicklung sind allerdings die Annahmen, daß sich der auf den Individualverkehr entfallende Anteil an der gesamten Verkehrsleistung nicht ändert und daß pro Automobil im Mittel die derzeitige jährliche spezifische Verkehrsleistung beibehalten wird.

Die Strukturanteile für die Aufteilung der gesamten Verkehrsleistung im Personenverkehr auf die einzelnen Verkehrsträger (Schienenverkehr, Luftverkehr, öffentlicher und individueller Straßenverkehr) sind Zahlenangaben in /7, 38, 111, 112, 113, 114, 116, 118/ entnommen (Abb. 50). Dabei wird für die zukünftige Entwicklung von einer gleichbleibenden strukturellen Aufteilung, wie sie derzeit vorliegt, ausgegangen, da keine gesicherten Prognosen über mögliche strukturelle Verschiebungen zwischen den Verkehrsträgern bekannt sind und die

(1)

Die Hochseeschifffahrt wird ausgeklammert, da sie energetisch bei den Bunkerungen erfaßt wird, also nicht am Endenergieverbrauch beteiligt ist.

Der Personenverkehr mit Binnenschiffen wird wegen des unbedeutenden Anteils vernachlässigt.

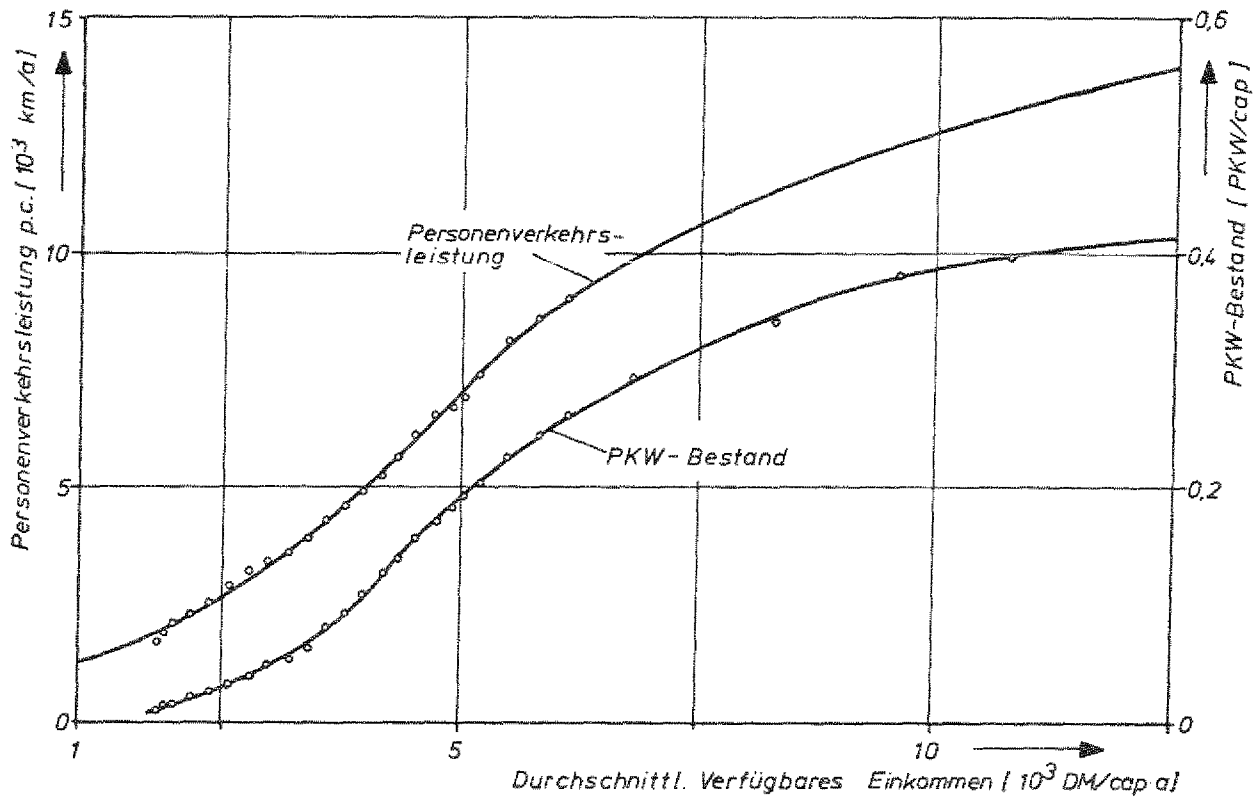


ABB. 49: Personenverkehrsleistung pro Kopf und PKW-Bestand pro Kopf als Funktion des durchschnittlich verfügbaren Einkommens (in Preisen von 1962).

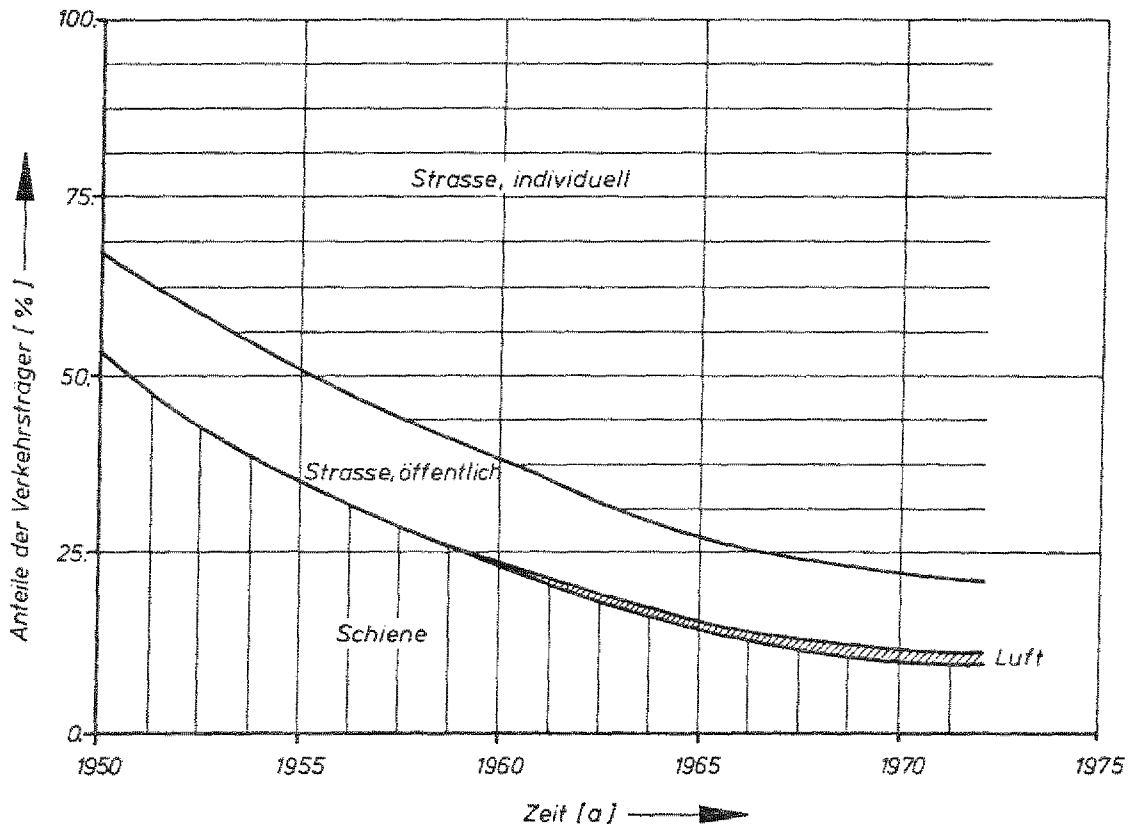


ABB. 50: Anteile der Verkehrsträger an der Personen-Verkehrsleistung

zukünftige Entwicklung des Verkehrs nicht nur von technischen und wirtschaftlichen Faktoren abhängt, sondern zu einem erheblichen Teil verkehrspolitisch entschieden wird /117/. Auch die Frage der eventuellen Einführung vollkommen neuer Verkehrssysteme ist noch nicht soweit geklärt, daß sichere Angaben über Einsatzart, -umfang und -zeitpunkt dieser Systeme berücksichtigt werden können.

Die Quantifizierung des spezifischen Energieeinsatzes der einzelnen Verkehrsträger bereitet Schwierigkeiten, denn die Höhe des Energieverbrauchs je Reisenden und Kilometer ($tSKE/cap \cdot km$) hängt von einer Vielzahl von Faktoren (z.B. der Witterung etc.) ab /101/, deren Einfluß nur sehr unvollkommen zu bestimmen ist. Da im Rahmen dieser Untersuchung solche Faktoren nicht weiter analysiert werden sollen, ist der spezifische Energieverbrauch als statistischer Durchschnittswert, der unter den in der Vergangenheit geltenden Bedingungen ermittelt wurde, zu betrachten. Zusätzlich wird vereinfachend angenommen, daß sich die verbrauchte Energiemenge bei den einzelnen Verkehrsträgern unabhängig von der Struktur der eingesetzten Energieträger bestimmen läßt. Da den Verkehrsträgern der Luft, des öffentlichen und des individuellen Straßenverkehrs jeweils ein Energieträger zugeordnet werden kann, nämlich Flugkraftstoffe, Dieselmotorkraftstoff, Vergasermotorkraftstoffe⁽¹⁾, spielt diese Voraussetzung lediglich im Schienenverkehr mit den alternativen Traktionsmöglichkeiten Kohle, Dieselmotorkraftstoff, Strom eine Rolle.

Die für den Schienenverkehr geltende Annahme ist dadurch gerechtfertigt, daß der für die Vergangenheit aus der Statistik ermittelte durchschnittliche spezifische Energieverbrauch bereits die Einflüsse der strukturellen Änderungen in den Traktionsarten enthält, während für die Zukunft (nach Aufgabe der Kohletraktion) nicht mehr sehr starke Strukturverschiebungen zwischen Dieselmotorkraftstoff und Strom zu erwarten sind (Abb. 55), so daß wie in der Vergangenheit mit einem über die Energieträgerstruktur gemittelten spezifischen Energieverbrauch gerechnet werden kann.

Zahlenwerte der Vergangenheit für den Energieeinsatz je Reisenden und Kilometer sind aus den statistischen Angaben über den Energieverbrauch und die Ver-

(1) Da der Verbrauch an Dieselmotorkraftstoff der im Individualverkehr betriebenen Diesel-PKWs etwa dem Verbrauch an Vergasermotorkraftstoffen der im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzten vergasermotorkraftstoffbetriebenen Fahrzeuge entspricht, entsteht bezüglich der Summe des Energieverbrauchs kein Fehler, wenn man dem öffentlichen Straßenverkehr nur Dieselmotorkraftstoff und dem individuellen Straßenverkehr nur Vergasermotorkraftstoffe zu-rechnet.

kehrsleistung der einzelnen Verkehrsträger errechnet worden, wobei dieselben Quellen, die zur Festlegung der Strukturaufteilung der Verkehrsleistung dienen, verwendet wurden. Zusätzlich sind für die Trennung des Energieverbrauchs im Schienenverkehr nach Reise- und Güterverkehrszwecken Unterlagen, die von /115/ erstellt wurden, ausgewertet worden. Die großen Unterschiede, die zwischen den einzelnen Verkehrsträgern im Energieverbrauch je 100 Personenkilometer vorhanden sind, zeigt beispielhaft für das Jahr 1970 Abb. 51.

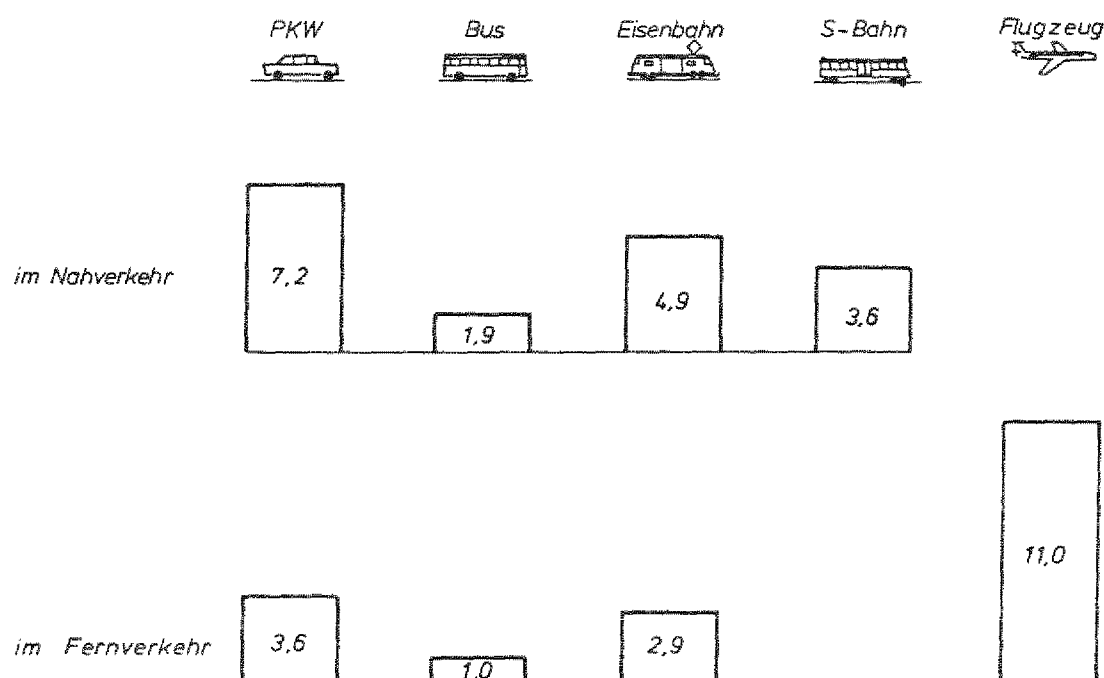


ABB. 51: Spezifischer Energieverbrauch unter Berücksichtigung der realen Verkehrsleistungen im Personenverkehr der BRD im Jahre 1970, in (kg SKE/100 cap·km), nach /14/.

Da sich bei allen Verkehrsträgern (außer im Schienenverkehr während der Umstellung der Zugförderung von Kohle auf Dieselkraftstoff und Strom) nur relativ geringe Veränderungen im spezifischen Energieverbrauch ergeben haben, wurden für die zukünftige Entwicklung Trends vorgegeben, die einem linearen oder - soweit dies aus der Vergangenheit erkennbar ist - einem logistischen Funktionsverlauf folgen.

Nach der Festlegung der Verkehrsleistung, der strukturellen Aufteilung nach Verkehrsträgern und der Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs in den

einzelnen Bereichen läßt sich nun der Energieverbrauch im Personenverkehr (unter den gegebenen Annahmen) berechnen, was schematisch in Abb. 52 dargestellt ist.

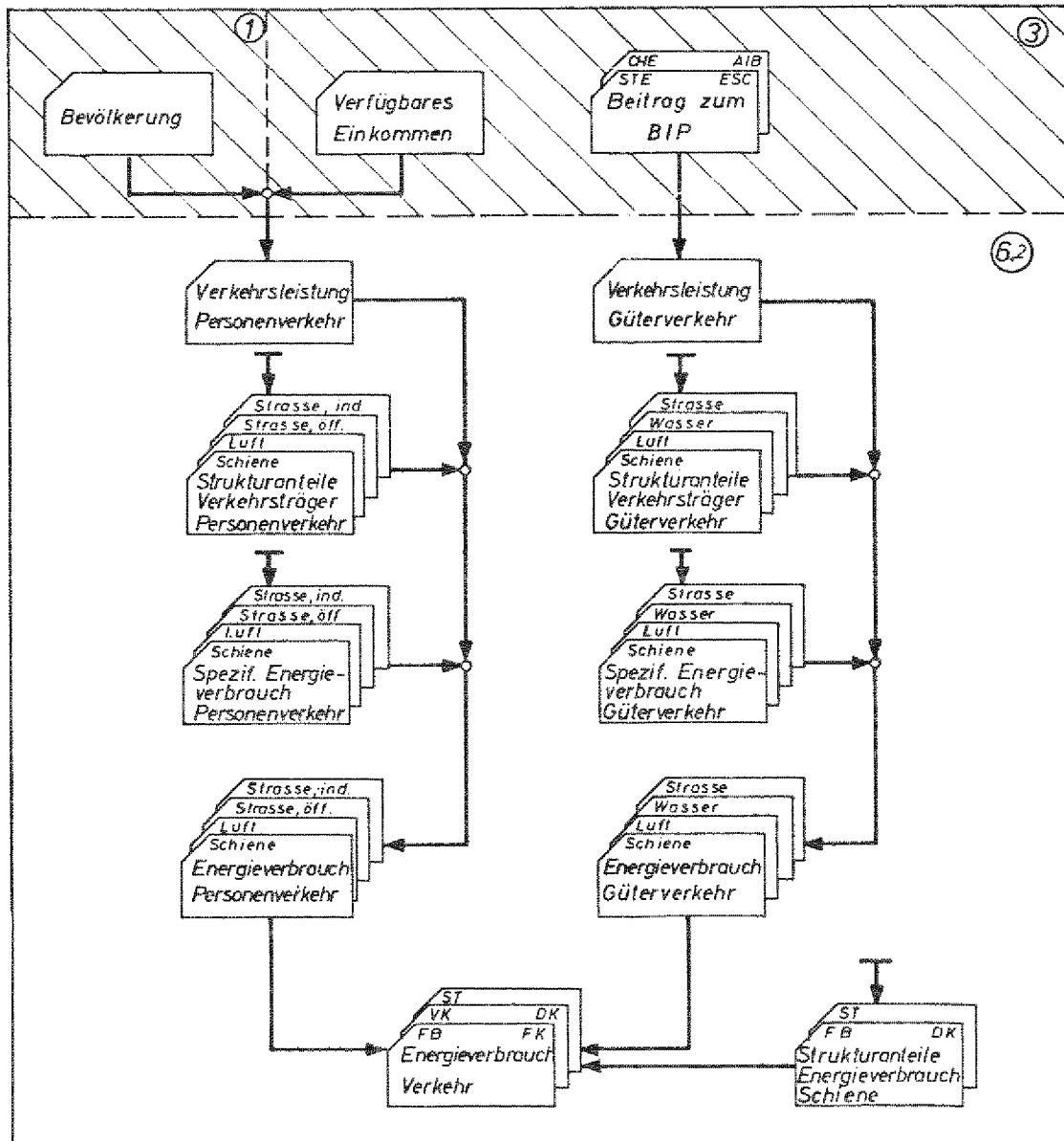


ABB. 52: Detailstruktur des Subsektors Energieverbrauch des Verkehrs (6.2) im Energieverbrauchssektor.

Für die Beschreibung der Entwicklung der Verkehrsleistung im Güterverkehrsbereich wird von der Veränderung des Produktionsvolumens (= Beitrag zum Brutto-Inlandsprodukt in konstanten Preisen der verarbeitenden Industrie, die nach der in 3.1 festgelegten Abgrenzung die Industrie der Steine und Erden, die Eisenschaffende Industrie, die Chemische Industrie sowie die Gruppe Andere Industrielle Bereiche umfaßt, ausgegangen (Abb. 53). Bei dieser Zusammenfassung wird vorausgesetzt, daß strukturelle Änderungen in der Zusammensetzung des Produktions-

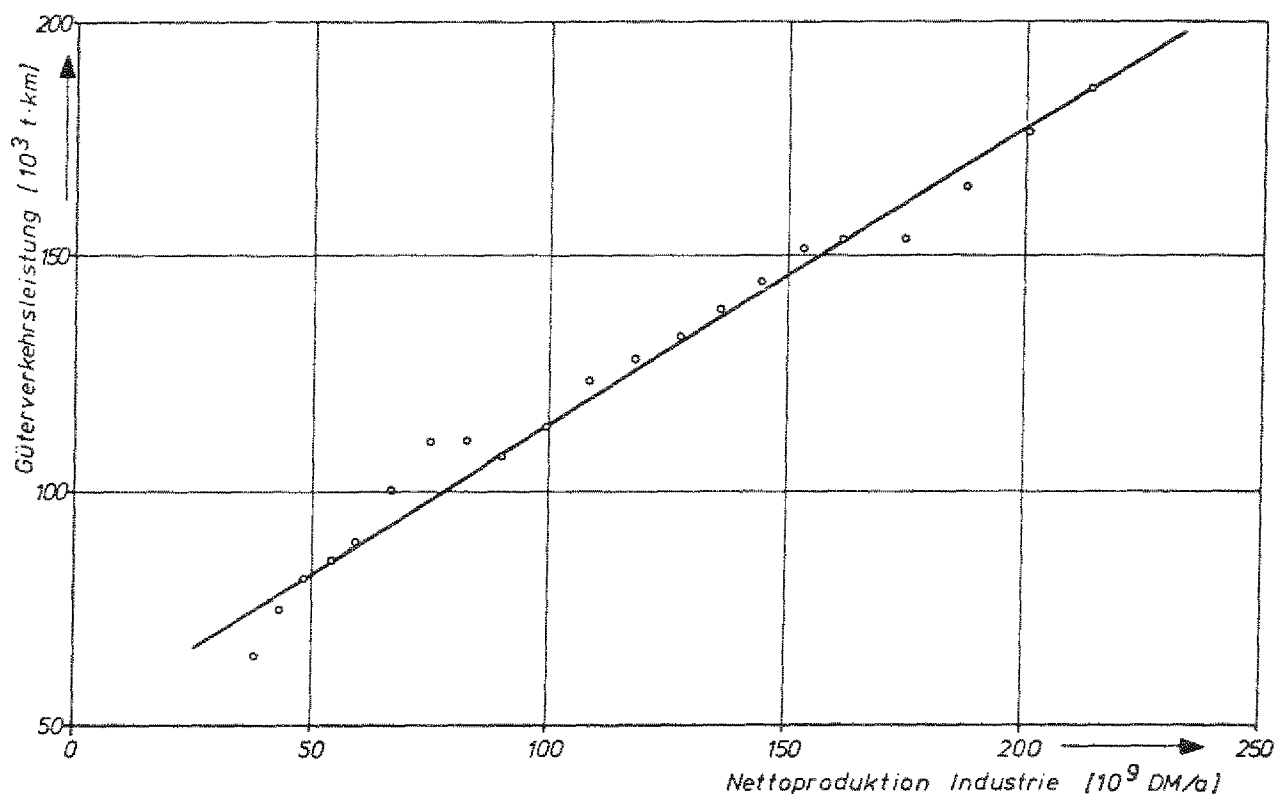


ABB. 53: Güterverkehrsleistung als Funktion der Nettoproduktion der Industrie (in Preisen von 1962)

volumens keinen Einfluß auf die Transportbedingungen und somit auf die Verkehrsleistung haben.

Die Strukturaufteilung der Güterverkehrsleistung nach Energieträgern und die Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs in den einzelnen Bereichen geschieht in derselben Weise unter Verwendung desselben Quellenmaterials und unter Einführung der entsprechenden Prämissen und Schlußfolgerungen wie beim Personenverkehr (Abb. 54). Dabei werden den Verkehrsträgern Luft, Wasser (Binnenschifffahrt) und Straße (Güterkraftverkehr) die Energieträger Flugkraftstoffe und Dieselkraftstoff zugeordnet, während beim Schienenverkehr Kohle, Dieselkraftstoff und Strom als Energieträger zur Wahl stehen.

Gibt man für den Energieverbrauch im Schienenverkehr (Personen- und Güterverkehr) eine Strukturaufteilung nach Traktionsarten vor (Abb. 55), so läßt sich der gesamte Energieeinsatz im Verkehr mit den zugehörigen Energieträgern nach den oben beschriebenen Verfahren ermitteln.

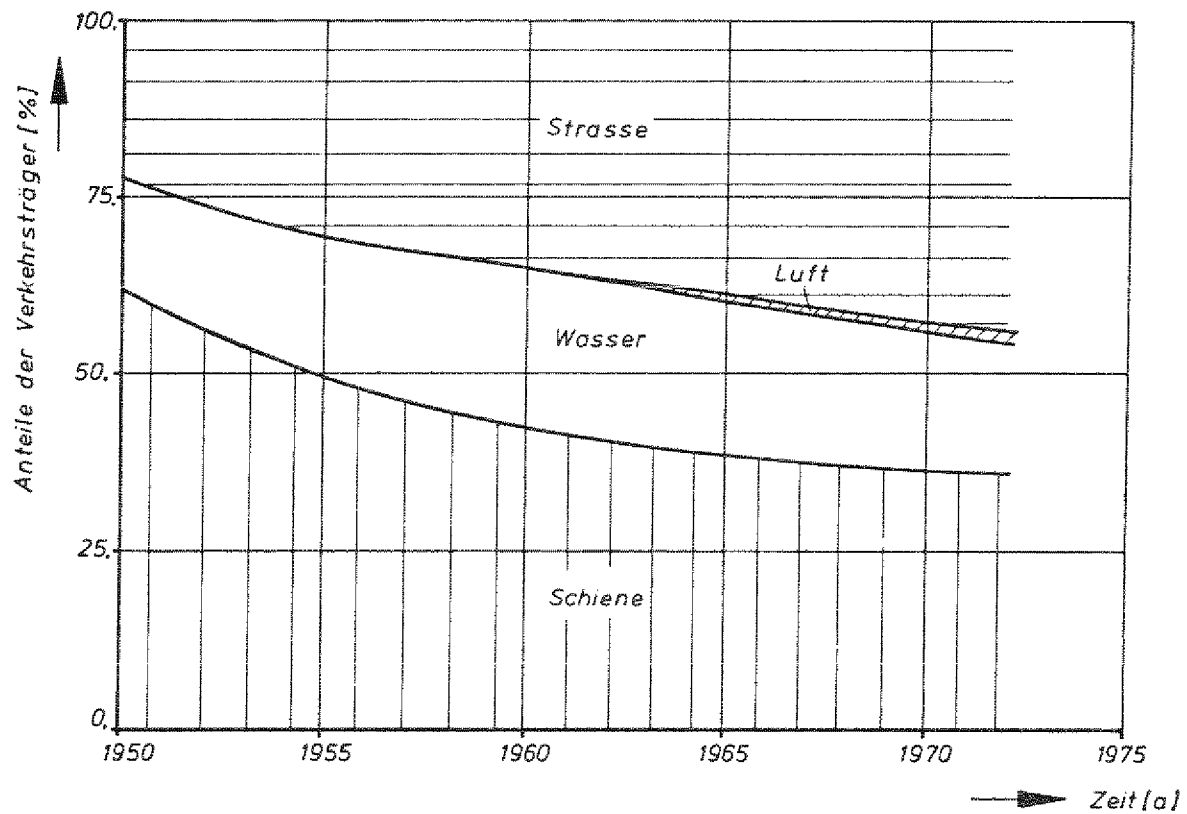


ABB. 54: Anteile der Verkehrsträger an der Güterverkehrsleistung

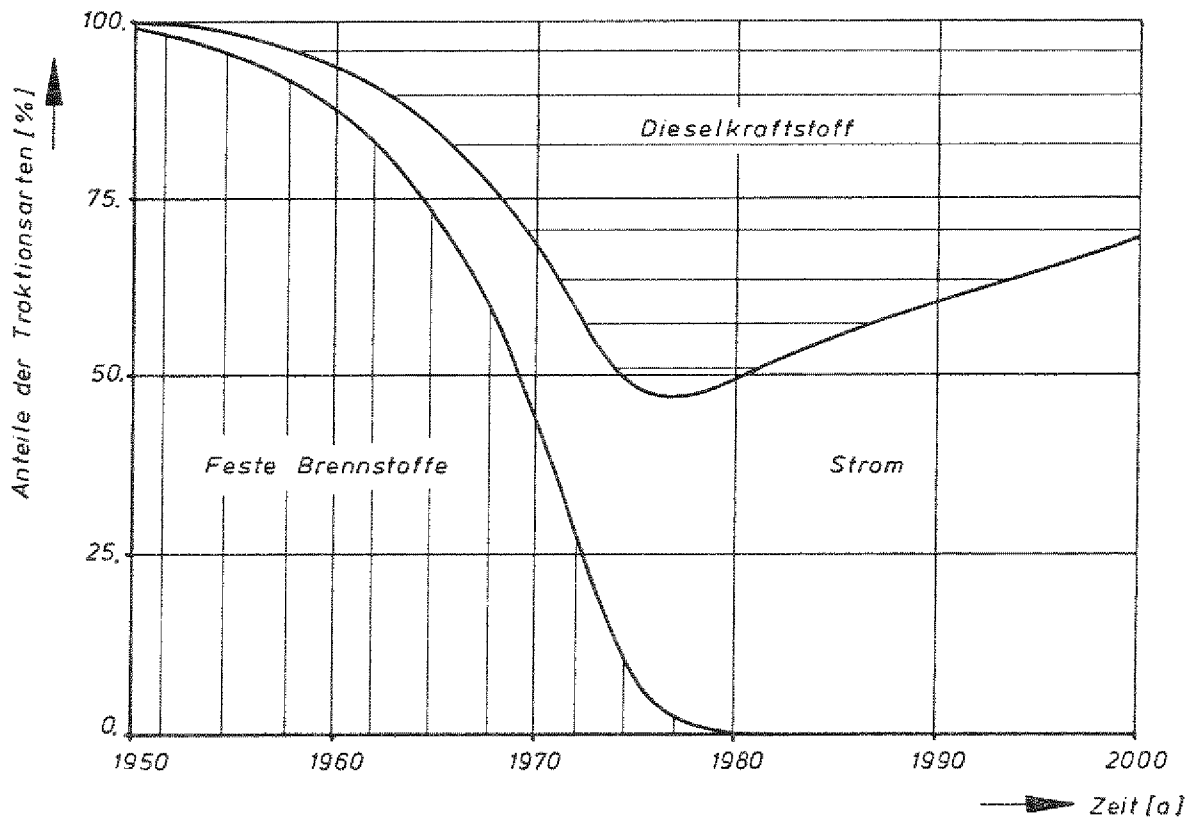


ABB. 55: Anteile der Traktionsarten am Energieverbrauch im Schienenverkehr

Für die Berechnung des Energieverbrauchs in den vier Industriegruppen wird vom spezifischen Energieeinsatz der einzelnen Sektoren, der als Verhältnis von Energieverbrauch zu Nettoproduktion definiert ist, ausgegangen. Mit dem auf die Produktion bezogenen Energieverbrauch der Industriegruppen und den bereits festgelegten sektorspezifischen Produktionsziffern läßt sich somit der Energieverbrauch in jeder Gruppe insgesamt bestimmen und mit Hilfe vorgegebener Strukturanteile nach Energieträgern differenzieren (Abb. 56).

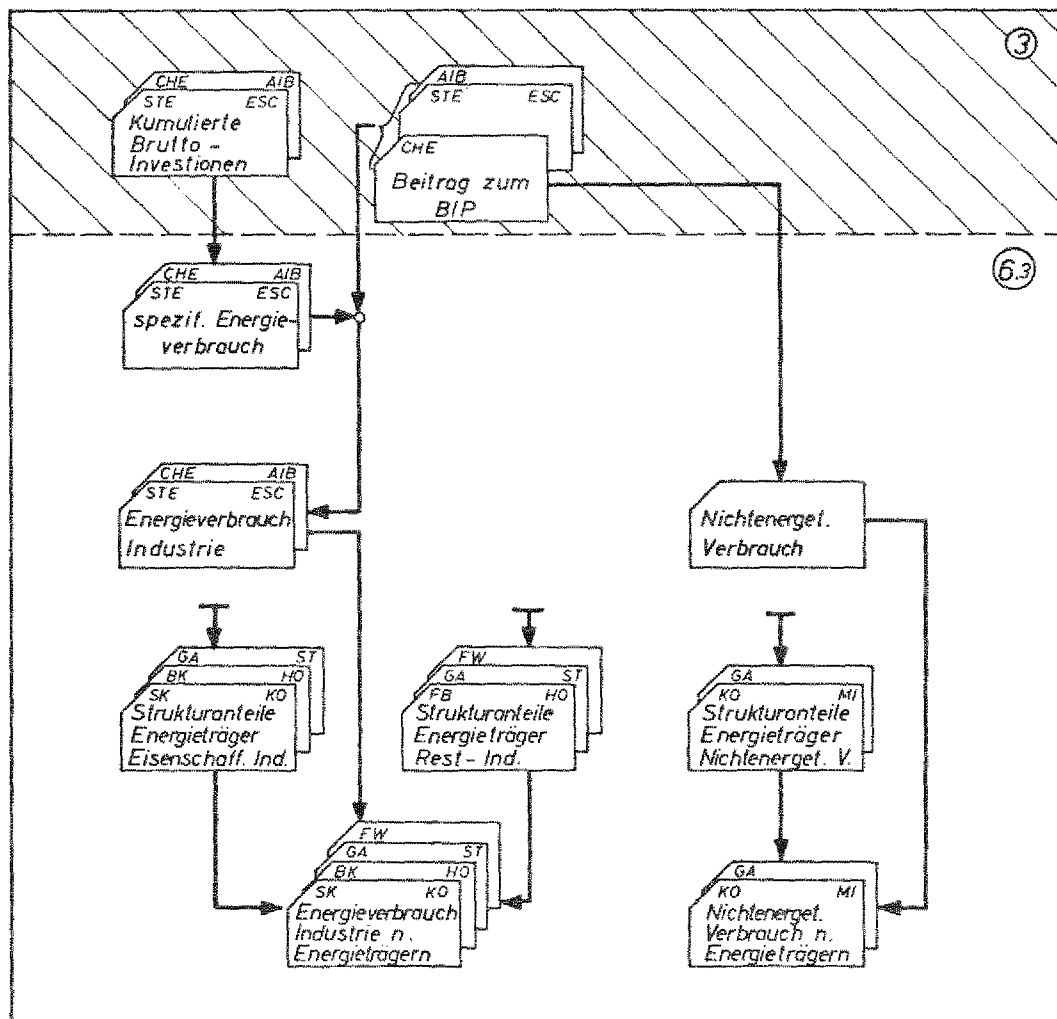


ABB. 56: Detailstruktur des Subsektors Energieverbrauch der Industrie und Nichtenergetischer Verbrauch (6.3) im Energieverbrauchssektor.

Ähnlich wie im Verkehrssektor läßt sich der spezifische Energieverbrauch nur als statistisch ermittelter Durchschnittswert den Energieeinsatzes je Produktionseinheit, der durch eine Vielzahl von Faktoren (z.B. den Produktionsverfahren, den Temperaturbereichen oder der Produktionsstruktur) beeinflußt wird,

quantifizieren, wenn nicht spezielle eigene Erhebungen durchgeführt werden. Im Rahmen der Zielsetzungen dieser Untersuchung wird jedoch von dem vorliegenden Zahlenmaterial ausgegangen; wegen der vielen Unsicherheiten, die mit einer derart aggregierten Handhabung des spezifischen Energieverbrauchs verbunden sind, kann weiter unterstellt werden, daß sich der Energieverbrauch unabhängig von der Wahl der Energieträger bestimmen läßt.

Geht man also davon aus, daß für die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs der einzelnen Industriegruppen keine Struktureffekte eliminiert werden können, so lassen sich die beobachteten Veränderungen im Energieeinsatz je Produktionseinheit näherungsweise durch den Einfluß des technischen Fortschritts in der Energienutzung erklären. Denn ähnlich wie sich die Produktivität durch den Einsatz neuer Produktionsanlagen und -verfahren laufend verbessert hat, steigt aus den gleichen Gründen der Wirkungsgrad der eingesetzten Energie an /1/. Will man nun den Bestimmungsfaktor technischer Fortschritt in seinen Wirkungen auf den Energieeinsatz erfassen, so kann - wie bei der Veränderung der Produktion - eine Korrelation zwischen dem spezifischen Energieverbrauch und den kumulierten Brutto-Investitionen angestellt werden. Diese Erklärung, der die folgende Vorstellung zugrunde liegt, daß die relativen Energieeinsparungen geringer werden, obwohl die kumulierten Investitionen und damit die Rationalisierungsbemühungen zunehmen, wurde zuerst von /13/ verwendet. Für die in der vorliegenden Untersuchung benutzten Funktionszusammenhänge zwischen dem auf das Jahr 1950 normierten spezifischen Energieverbrauch und den kumulierten Brutto-Investitionen wurden Zahlenangaben über den Energieverbrauch der industriellen Sektoren aus /7, 8, 123 und 124/ entnommen. Die Korrelation zeigt beispielhaft für eine Industriegruppe Abb. 57.

Für die Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf die eingesetzten Energieträger (Steinkohle, Koks, Braunkohle, Heizöl, Gas, Strom, Fernwärme) werden Strukturanteile exogen vorgegeben. Dabei wird die Eisenschaffende Industrie wegen des bei der Koksmetallurgie notwendigen Kohleeinsatzes gesondert behandelt, während die drei anderen Industriegruppen (Industrie der Steine und Erden, Chemische Industrie und Andere Industrielle Bereiche) zusammen betrachtet werden. Zahlenangaben für die Strukturaufteilung in der Vergangenheit sind den Quellen entnommen, die auch für die Festlegung des spezifischen Verbrauchs dienen. Für die zukünftige Entwicklung werden im Zusammenhang mit den Strategierechnungen (Abschnitt 4) alternative Annahmen getestet.

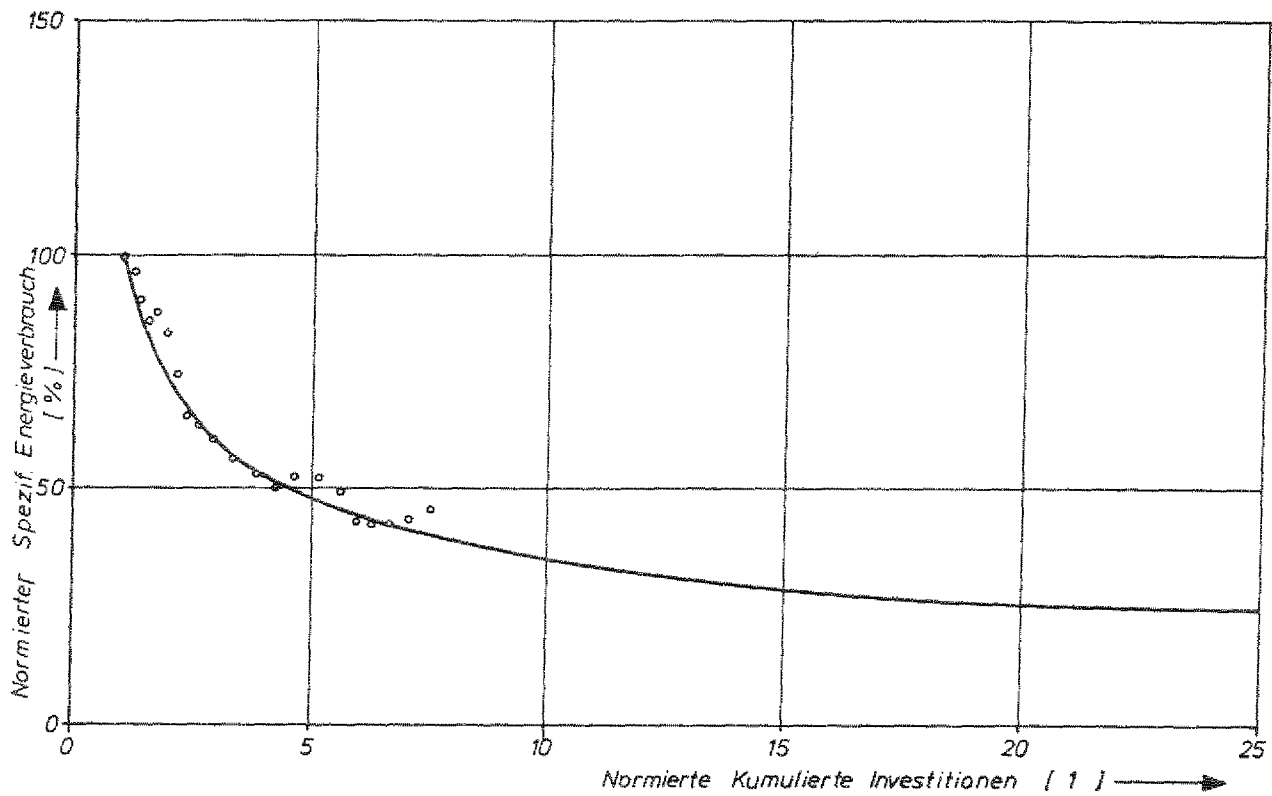


ABB. 57: Normierter spezifischer Energieverbrauch als Funktion der normierten kumulierten Brutto-Investitionen in der Industrie-gruppe Steine und Erden.

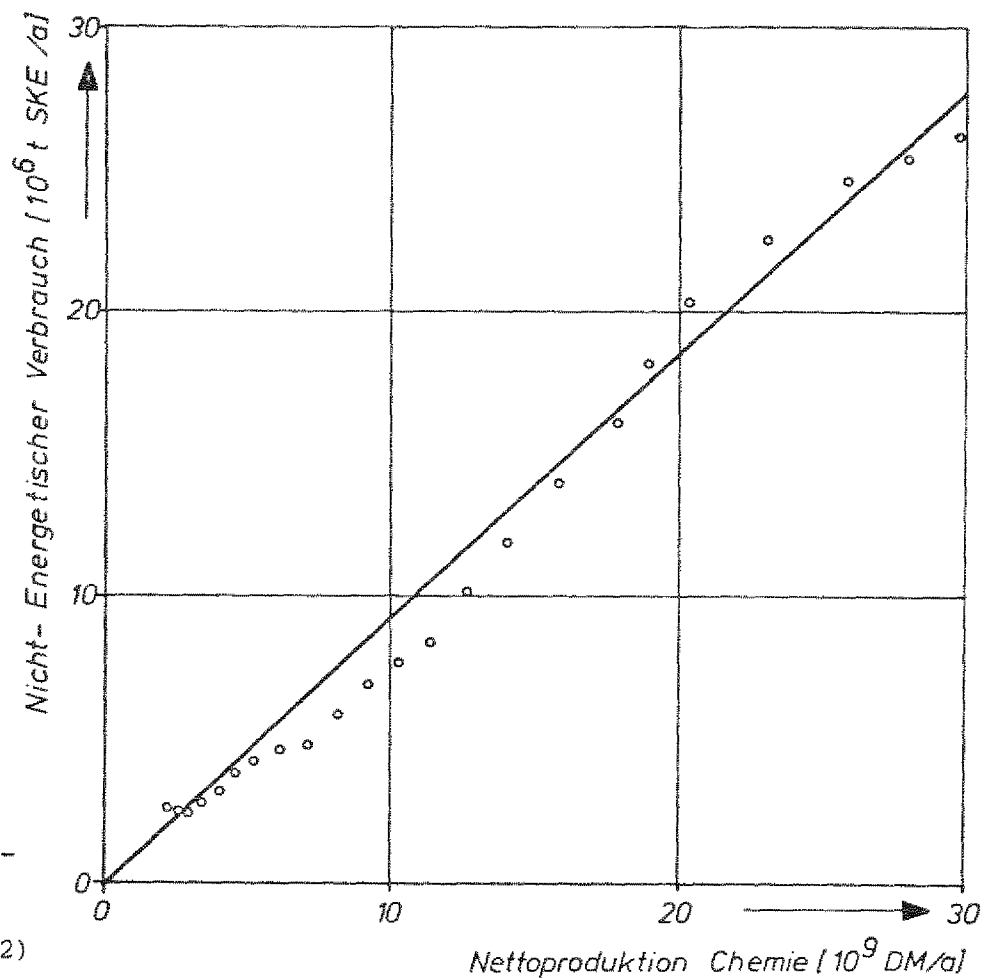


ABB. 58:

Nichtenergetischer Verbrauch als Funktion der Nettoproduktion der Chemie (in Preisen von 1962)

Der nichtenergetische Verbrauch von aus Kohle, Mineralöl und Gas gewonnenen Produkten kann in Abhängigkeit vom Produktionsvolumen der Chemischen Industrie formuliert werden (Abb. 58), wobei für die Strukturaufteilung nach Energieträgern ebenso wie beim Endenergieverbrauch der Industrie verfahren wird und auch dieselben Quellen verwendet werden.

Mit den beschriebenen Verfahrensschritten kann die Entwicklung des Energieverbrauchs in den einzelnen Sektoren und für die verschiedenen eingesetzten Energieträger modellmäßig abgebildet werden. Das Modellverhalten ist an Hand der für die Vergangenheit vorliegenden Zeitreihen aus den angegebenen Quellen für den Basiszeitraum verifiziert worden. Die Übereinstimmung zwischen der realen und der simulierten Entwicklung während dieser Zeit läßt sich aus der Abb. 59 ersehen.

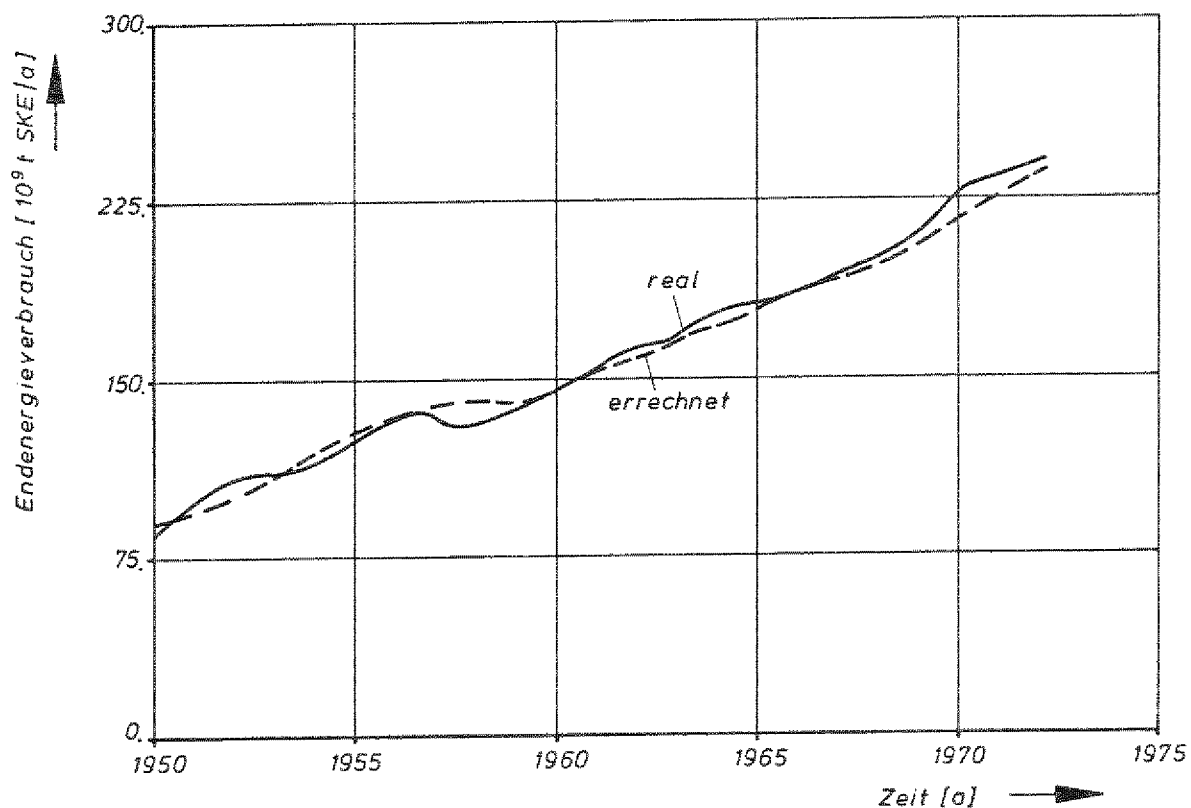


ABB. 59: Zur Verifizierung der Modellstruktur:
reale und errechnete Entwicklung des Endenergieverbrauchs.

3.3.4 Energieversorgungssektor

Ausgehend vom Energieverbrauch an Endenergie und für nichtenergetische Zwecke läßt sich der für die Befriedigung der Nachfrage erforderliche Primärenergie-

aufwand errechnen, wenn man den Energiefluß aller Energieträger über die Verteilungs- und Umwandlungsstufen bis zur Energiegewinnung zurückverfolgt (Abb. 60).

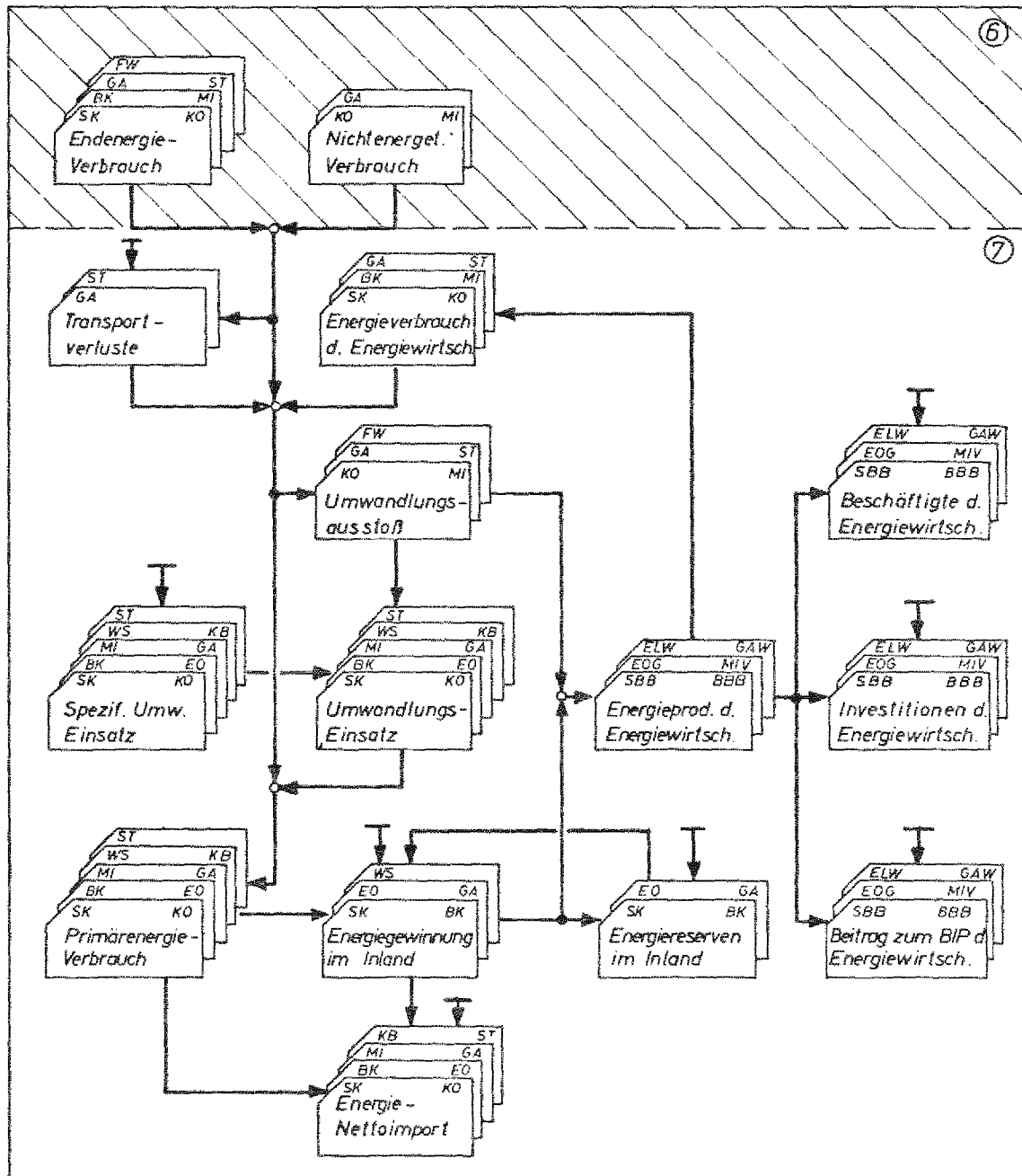


ABB. 60: Detailstruktur des Energieversorgungssektors (7)

Zusammen mit Angaben über die Entwicklung der inländischen Reserven, über die spezifischen Abbau- bzw. Förderbedingungen und mit der Festlegung der Produktionskapazitäten in der Energiewirtschaft kann der Energieanteil am gesamten Primärenergieaufkommen, der im Inland gewonnen wird und derjenige, der vom

Ausland zu beziehen ist, bestimmt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß - abhängig von Verteilungsstrukturen, die sich regional unterschiedlich durch die jeweiligen Marktkräfte ausbilden - selbst bei einem hohen Gesamtimportbedarf an Energie in gewissem Umfang einzelne Energieträger exportiert werden können. Die Differenz zwischen Einfuhr und Ausfuhr von Energie, der Energie-Nettoimport, gibt also mit dem Vorzeichen an, in welche Richtung der Außenhandel mit Energie geht.

Für die Produktion der Energiewirtschaft in den verschiedenen Stufen der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung wird einerseits selbst Energie verbraucht, andererseits werden Arbeitskräfte eingesetzt und es sind Investitionen für den Ausbau der Produktionskapazitäten erforderlich. Bewertet man die Produktion der Energiewirtschaft in Geldeinheiten (zu konstanten Preisen) und berücksichtigt die hierfür von anderen Wirtschaftsbereichen erbrachten produktionsnotwendigen Vorleistungen, so kann der Nettoproduktionswert bzw. der Beitrag der Energiewirtschaft zum Bruttoinlandsprodukt quantifiziert werden. Mit diesen in Abb. 60 schematisch dargestellten Funktionszusammenhängen schließt sich der Kreis von Definitions- und Verhaltensgleichungen, die die ökonomischen, energetischen und technischen Beziehungen zwischen den Energieverbrauchern, den Energieversorgern und den an der volkswirtschaftlichen Leistungserstellung beteiligten Gruppen kennzeichnen.

Die Struktur des Umwandlungsbereichs der Energiewirtschaft ist durch verschiedene Umwandlungsverfahren charakterisiert. In Anlehnung an /7/ werden für die vorliegende Untersuchung die folgenden Transformationssektoren unterschieden:

- Zechen- und Hüttenkokereien, Ortsgaswerke,
- Elektrizitätswerke,
- Fernheizwerke,
- Hochöfen,
- Raffinerien, sonstige Energieerzeuger⁽¹⁾

(1)

Sonstige Energieerzeuger sind nach der in /7/ angegebenen Definition:

- a) die Kohlenwertstoffbetriebe,
- b) die Chemische Industrie, soweit sie Energieträger in Form von Pyrolysebenzin, Restgasen und Rückständen aus der Verarbeitung von Rohbenzin, Raffinerie- und Flüssiggas erzeugt und an die Raffinerien zurückliefert (Rücklaufmengen)
- c) die Aufbereitungsanlagen der Erdölgasgewinnung mit dem Anfall von Flüssiggas und Benzin.

Die diesen Umwandlungssektoren auf der Einsatz- und Ausstoßseite zuzuordnenden Energieträger sind in Tab. 20 angegeben. Weitere Umwandlungsarten, insbesondere die Kohlevergasung und Methanspaltung, werden im Zusammenhang mit den Strategien zur Einführung neuer Energietechnologien im Abschnitt 4 diskutiert. An dieser Stelle der Modellentwicklung wird zunächst von den vorhandenen Transformationsbereichen ausgegangen.

		Steinkohle (SK)	Koks (KO)	Braunkohle (BK)	Eröl (EO)	Mineralölprod. (MI)	Gas (GA)	Wasserkraft (WS)	Kernenergie (KB)	Strom (ST)	Fernwärme (FW)
Umwandlungs- einsatz	Zechen-, Hüttenkokereien, Ortsgaswerke	X									
	Elektrizitätswerke	X		X		X	X	X	X	X ⁽¹⁾	
	Fernheizwerke	X				X	X		X		
	Hochöfen		X								
	Raffinerien Sonstige Energieerzeuger		X		X	X					
Umwandlungs- ausstoß	Zechen-, Hüttenkokereien Ortsgaswerke		X				X				
	Elektrizitätswerke									X	
	Fernheizwerke										X
	Hochöfen						X				
	Raffinerien Sonstige Energieerzeuger		X			X	X				

(1) Pumpstromaufwand

TAB. 20: Umwandlungsstruktur des Versorgungssektors

Bei der Zuordnung von Ausstoß- und Einsatzmengen in den Umwandlungssektoren ist zu berücksichtigen, daß die erzeugten Sekundärenergien in einigen Fällen aus Koppelprozessen stammen; dies trifft z.B. für Koks und Gas bei der Verkokung, für das Spektrum der Mineralölprodukte bei der Rohöldestillation und zum Teil für Strom und Wärme (als Fernwärme oder Prozeßwärme) bei thermischer Umwandlung zu. Da der Anteil der Koppelprodukte bei den einzelnen Umwandlungsverfahren teilweise variabel ist, ist eine Zuordnung des Umwandlungseinsatzes auf die anfallenden Sekundärenergien problematisch. Außerdem weisen die Umwandlungsanlagen für gleiche Sekundärenergieträger altersstrukturbedingt Un-

terschiede im spezifischen Brennstoffverbrauch auf, die in Anlagenverbesserungen aufgrund technischen Fortschritts begründet sind. Abb. 61 verdeutlicht dies am Beispiel des Steinkohleeinsatzes in öffentlichen Wärmekraftwerken.

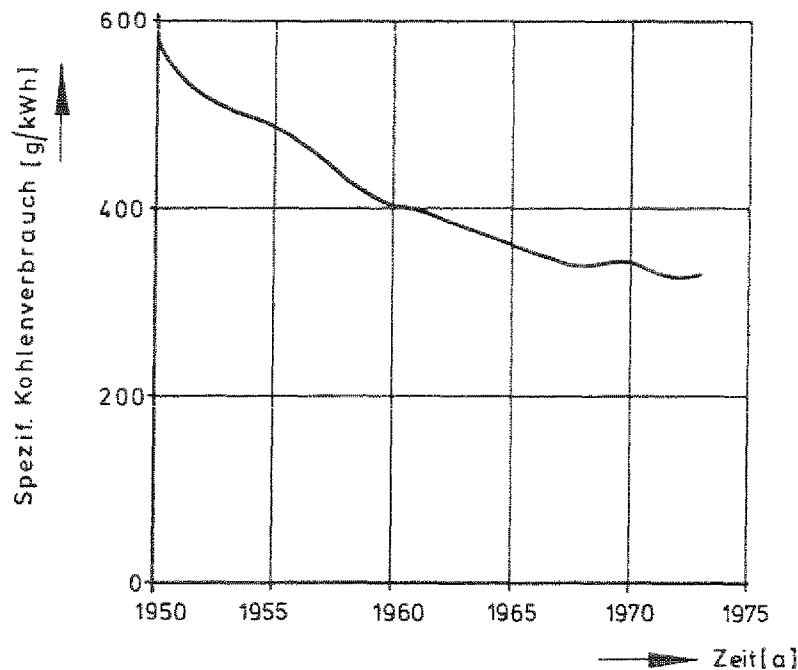


ABB. 61: Spezifischer Kohlenverbrauch in öffentlichen Steinkohlekraftwerken, nach /48/

Da es nicht Ziel dieser Untersuchung ist, verfahrensmäßige Einzelheiten im Umwandlungsbereich darzustellen, sondern die wesentlichen Auswirkungen bestimmter Energietechnologien auf die Versorgungsstruktur zu quantifizieren, wird hier mit mittleren energieträger- und umwandlungstypspezifischen Einsatzfaktoren sowie mit einem festen Verteilungsspektrum bei Koppelproduktion gerechnet. Im folgenden wird die Verfahrensweise der Primärenergieberechnung für den gesamten Transformationssektor näher diskutiert.

Geht man vom Endenergieverbrauch und vom Nichtenergetischen Verbrauch mit einer vorliegenden Aufteilung nach Energieträgern aus und berücksichtigt die Transportverluste bei Gas und Strom durch eine proportionale Verlustgröße, so läßt sich der Energieverbrauch vor Verteilung an die Endverbraucher angeben. Mit der rekursiven Errechnung des Energieverbrauchs aus den folgenden Stufen der Energiegewinnung und -umwandlung sowie des Energieeinsatzes der sekundären Umwandlung (Beispiel: Heizöl $\rightarrow$ Strom) kann der gesamte Sekundär- und der

nichtumwandlungsbedingte Primärenergieträgerbedarf bestimmt werden. Ist der Nettoimportanteil (Import - Exportanteil) für den Gesamtbedarf an Sekundärenergieträgern gegeben, so läßt sich der (inländische) Umwandlungsausstoß separieren und mit Hilfe von spezifischen Faktoren auf den Umwandlungseinsatz zurückrechnen. Der Primärenergieverbrauch kann somit aus der Summenbilanz des Umwandlungseinsatzes, der Sekundärenergie aus Nettoimporten und dem nicht-umwandlungsbedingten Primärenergieträgerbedarf abgeleitet werden (Abb. 60).

Zahlenwerte für die Bestimmung der spezifischen Transportverluste, der Umwandlungsstruktur, des spezifischen Umwandlungseinsatzes, der Nettoimportanteile und des Verbrauchs in der Energiewirtschaft sind /7, 8, 20, 31, 48, 122, 124/ entnommen.

Für die Strukturaufteilung der Brutto-Stromerzeugung der Kraftwerke in der Zukunft wurden dabei eine in /31/ vorgestellte Prognose sowie die in /3/ und /33/ genannten Richtwerte verwendet. Die Veränderung des spezifischen Brennstoffeinsatzes bei fossilen Kraftwerken mit Dampf- oder Gasturbinenprozeß ist in den letzten Jahren deutlich geringer geworden /48/, daher wird auch für die zukünftige Entwicklung hier nur eine relativ kleine Wirkungsverbesserung erwartet. Denn erhöhte Umweltschutzaufgaben wie z.B. der Übergang von Naß- auf Trockenkühltechnik oder die Einführung der Rauchgas- bzw. Brennstoffentschwefelung erfordern einen größeren Energiedurchsatz. Eine Vergrößerung des Umwandlungswirkungsgrades im Kernenergiebereich wird jedoch durch die Einführung der Hochtemperaturtechnologie möglich sein. Für die Nettoimporte der Sekundärenergien Koks, Mineralölprodukte und Strom wird ein auch in Zukunft gleichbleibender Anteil am gesamten Bedarf für diese Energieträger unterstellt. Die zukünftige Energiegewinnung im Inland an Steinkohle, Braunkohle, Erdöl und Erdgas sowie Wasserkraft ist durch eine obere Grenze gekennzeichnet, die von der Reservesituation bzw. den Abbau-, Förder- und Aufkommensbedingungen abhängt. Dabei kann für Wasserkraft heute bereits mit einer 95 %-igen Ausnutzung des Potentials gerechnet werden; bei Erdöl und Erdgas werden die derzeitig bekannten wirtschaftlich gewinnbaren Reserven innerhalb von 10 bzw. 20 Jahren erschöpft sein, wenn das gegenwärtige Fördervolumen beibehalten wird. Bei der Steinkohle sind dagegen in der Hauptsache wirtschaftliche Faktoren für eine mögliche Produktionsbegrenzung entscheidend (siehe Abschnitt 1). Es wird jedoch unterstellt, daß auch weiterhin ein großes Interesse an einem hohen Sockel inländischer Steinkohleförderung besteht und daß gegebenenfalls Kostengesichtspunkte hinter gesamtwirtschaftlichen und Versorgungssicherheitsaspek-

ten zurücktreten, so daß eine allmähliche Kapazitätssteigerung von $100 \cdot 10^6$ t (Förderung 1973: $97,6 \cdot 10^6$ t) bis auf $120 \cdot 10^6$ t möglich ist, falls ein entsprechender Absatzmarkt existiert. Im Braunkohlensektor wird durch die Aufschließung neuer Tagebaue in der Niederrheinischen Bucht auch in der Zukunft eine nahezu 100 %-ige Selbstversorgung in der Energiebedarfsdeckung erreichbar sein. Es wird daher für die weitere Entwicklung mit dem gegenwärtigen Nettoimportanteil von ca. 3 % gerechnet.

Mit den so gekennzeichneten Produktionsgrenzen und den vorgegebenen Nettoimporten bei Sekundärenergieträgern läßt sich das gesamte für die Deckung des Primärenergieverbrauchs erforderliche Energieaufkommen auf die inländische Energiegewinnung und auf die Energie-Nettoimporte (Primär- und Sekundärenergieträger) verteilen. Die an den Zeitreihen der Vergangenheit verifizierte Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der Energiegewinnung im Inland wird in Abb. 62 durch das reale und das modellmäßig errechnete Zeitverhalten wiedergegeben.

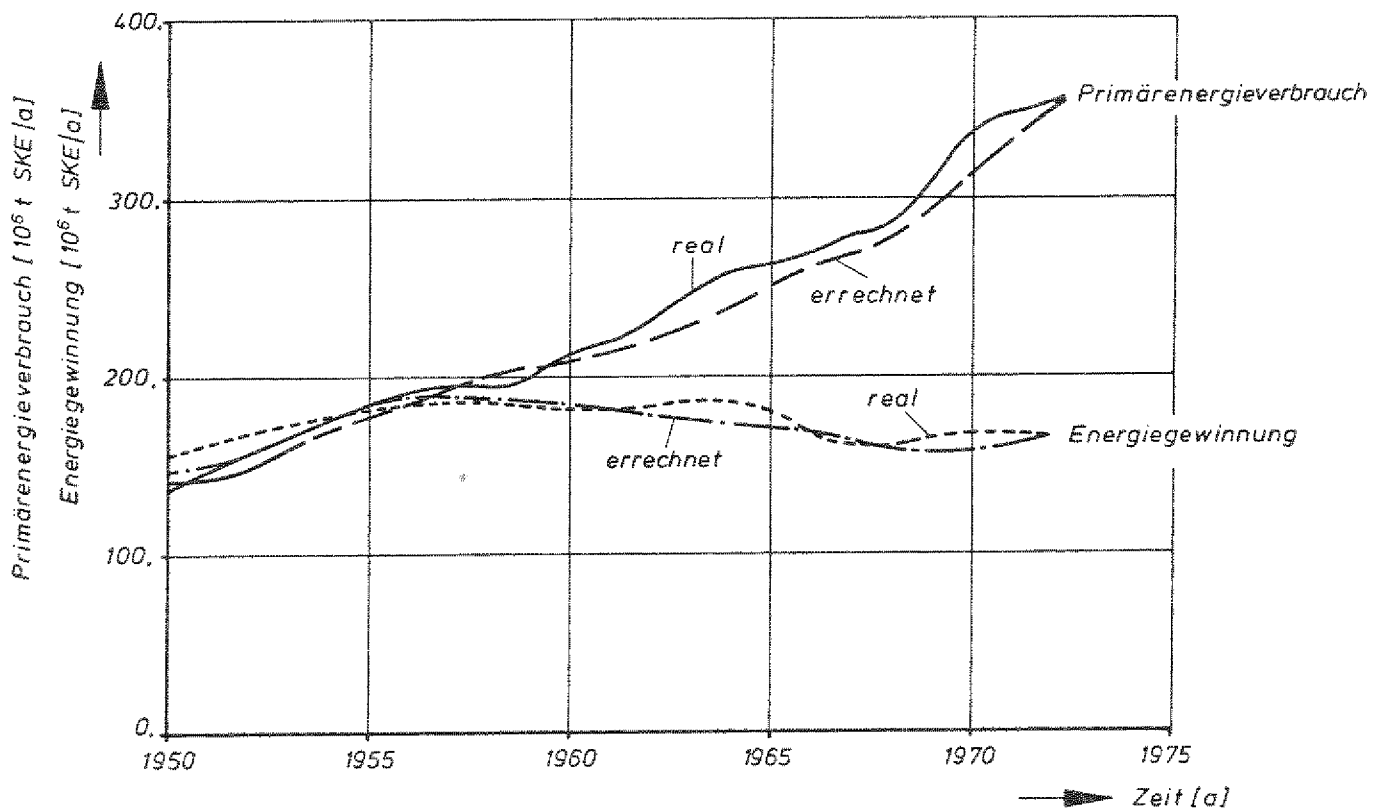


ABB. 62: Zur Verifizierung der Modellstruktur:
reale und errechnete Entwicklung des Primärenergieverbrauchs
und der Energiegewinnung im Inland.

Die Bestimmung der Beschäftigtenzahlen, des Investitionsvolumens und des Beitrages zum Bruttoinlandsprodukt der Energiewirtschaft erfolgt mit Hilfe spezifischer auf die Energieproduktion bezogener Größen, der Arbeitsproduktivität ($= \text{Beschäftigte} / \text{Energieproduktion}$), dem spezifischen Investitionsaufwand ($= \text{Brutto-Investitionen} / \text{Energieproduktion}$) und der spezifischen Nettoproduktion ($= \text{Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt} / \text{Energieproduktion}$). Für die quantitative Darstellung dieser exogen formulierten Variablen sind Zahlenangaben aus /8, 38, 46, 47, 48, 59, 76, 125/ verwendet worden. Dabei wurde für die zukünftige Entwicklung der Arbeitsproduktivität und der spezifischen Nettoproduktion tendenziell gleiches Verhalten wie in der Vergangenheit unterstellt. Bei den spezifischen Investitionsaufwendungen wurde dagegen auf Grundlage von eigenen sowie aus der angegebenen Literatur entnommenen Abschätzungen mit einer steigenden Tendenz gerechnet, wie in Abschnitt 1.3.3 begründet ist.

4 ERGEBNISSE DER SIMULATIONSRECHNUNGEN

4.1 Allgemeine Bemerkungen zu den Simulationsbedingungen

Zur Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft mit Hilfe eines Simulationsmodells wurden im Abschnitt 3 die einzelnen Strukturelemente identifiziert und die funktionalen Zusammenhänge zwischen den veränderlichen Größen quantifiziert. Die Beschreibung der Wechselwirkungen der miteinander gekoppelten Variablen erfolgte durch die im einzelnen abgeleiteten Definitions- und Verhaltensgleichungen unter Berücksichtigung des realen dynamischen Verhaltens. Neben den endogenen Modellgrößen, die aufgrund der dargestellten Ursache-Wirkungsbeziehungen in funktionaler Abhängigkeit von anderen Veränderlichen stehen, sind eine Reihe von exogenen Modellparametern erforderlich, die die Entwicklung der Energiewirtschaft unter alternativen äußeren (d.h. nicht in der Definitions- und Verhaltensebene fixierten) Bedingungen kennzeichnen. Auf diese Weise lassen sich die verschiedenen denkbaren externen Eingriffe - wie sie im Zusammenhang mit der Identifizierung der Untersuchungsziele in Abschnitt 2.2 angegeben wurden - darstellen. Die Charakterisierung der Variablen als endogene oder exogene Modellparameter erfolgte bereits bei der Strukturfestlegung des Modells (Abschnitt 3). Im folgenden werden nun die Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen analysiert, indem dem Modellverhalten unter definierten Standardbedingungen die Auswirkungen bei veränderten (speziellen) Bedingungen, die sich durch alternative Annahmen und Hypothesen für die exogenen Parameter ergeben, gegenübergestellt werden.

4.2 Modellverhalten unter Standardbedingungen

Zu den Standardbedingungen gehören die in Abschnitt 3 bei der Ableitung der Definitions- und Verhaltensgleichungen im einzelnen erörterten Voraussetzungen sowie die folgenden Annahmen, die auf eine möglichst gleichmäßige und stabile Entwicklung innerhalb der gesamten Volkswirtschaft abgestellt sind. Es werden dabei stetiges Wirtschaftswachstum, eine kontinuierliche, ungestörte Energieversorgung und eine allmähliche Verringerung des relativen Erdöl-

anteils am Primärenergieverbrauch innerhalb der Entwicklung bis zum Jahr 2000 unterstellt.

Geht man davon aus, daß ein angemessenes gesamtwirtschaftliches Wachstum in unserer ökonomischen und sozialen Ordnung nur zusammen mit den übrigen wirtschaftspolitischen Grundzielen

- hoher Beschäftigungsstand,
- Geldwertstabilität,
- außenwirtschaftliches Gleichgewicht

angestrebt wird, so ist klar, daß das Wachstumsziel durch eine Reihe verschiedenartiger wirtschaftspolitischer Entscheidungen z.B. aus dem Bereich der Finanz- und Sozialpolitik geprägt ist, die im einzelnen nicht antizipiert werden können, wenn nicht das Verhalten der Entscheidungsgremien bekannt ist. Eine präzise Bestimmung der Aktivitäten der wirtschaftspolitischen Entscheidungsträger ex ante - wie z.B. Aussagen über bestimmte geld- und fiskalpolitische Maßnahmen, über die Veränderung von Wechselkursparitäten oder über tarifpolitische Entscheidungen - kann jedoch beim heutigen Stand der Kenntnisse nur sehr bedingt erfolgen⁽¹⁾. Da schon die Beurteilung kurzfristiger Wachstumszyklen und die dabei zur wirtschaftspolitischen Steuerung erforderlichen Maßnahmen vielfach durch eine Divergenz der Meinungen gekennzeichnet sind, dürfte eine Darstellung des Entscheidungsverhaltens für einen ferneren Zeitpunkt - auch aus Gründen der Veränderbarkeit gesellschaftlicher Normen und Ziele - nahezu unmöglich sein.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde daher auf eine umfassende Beschreibung aller wirtschaftspolitischen Instrumente verzichtet, stattdessen werden einzelne Maßnahmen simuliert und ihre Auswirkungen auf die Wirtschaftsentwicklung analysiert. Dabei wird generell unterstellt, daß diese Maßnahmen nicht zu Widersprüchen in der Erreichung der wirtschaftspolitischen Ziele füh-

(1

Die Tatsache, daß keine präzisen Aussagen über den zukünftigen wirtschaftspolitischen Kurs gemacht werden können, da das Verhalten der an den Entscheidungen beteiligten Gruppen selbst für die nächsten Jahre nur unter äußersten Vorbehalten angegeben werden kann, ist z.B. dem neuen Jahresgutachten 1974 des Sachverständigenrates zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung zu entnehmen /127/.

ren. Für die Rechnungen unter Standardbedingungen wird das in Abb. 63 angegebene Durchschnittswachstum zugrunde gelegt. Äußere Eingriffe, die durch Beeinflussung der unternehmerischen Investitionsentscheidungen oder durch Steuerung der Außenhandelsbeziehungen auf eine Veränderung des Wachstums abzielen, werden in Abschnitt 4.1.2 dargestellt.

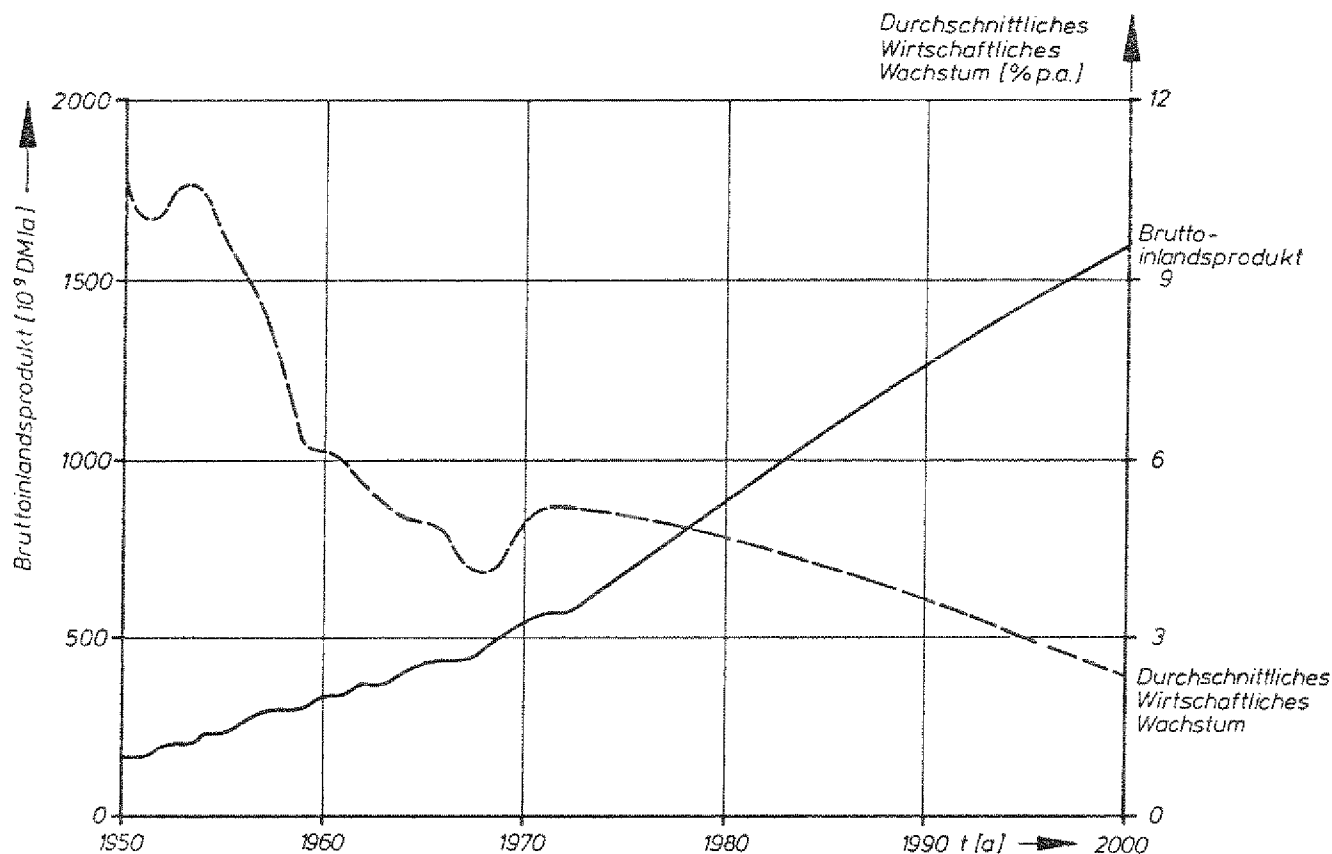


ABB. 63: Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und des wirtschaftlichen Wachstums (in Preisen von 1962)

Bei der in Abb. 63 gezeigten Wirtschaftsentwicklung ist von einer kontinuierlichen ungestörten Energieversorgung ausgegangen worden. Es wurde die Hypothese aufgestellt, daß unabhängig von der zukünftigen Preis- und Angebotssituation aus Gründen der langfristigen Stabilisierung des Energiemarktes ein relativer Rückgang des Erdölanteils zugunsten anderer Energieträger angestrebt wird. Dabei stehen der verstärkte Einsatz inländischer Kohle sowie die forcierte Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung im Vordergrund. Die zeitliche Entwicklung in der Veränderung des Brennstoffmarktes, die sich im vorliegenden Simulationsansatz auf exogene Zeitreihen abstützt, folgt dabei der im fortgeschriebenen Energieprogramm der Bundesregierung /33/ angegebenen Ten-

denz. Neu einzuführende Energietechnologien (wie z.B. die Kohlevergasung oder die Methanspaltung mittels nuklearer Prozeßwärme) finden in dieser ersten Rechnung keine Berücksichtigung. Die durch sie erzielbaren Veränderungen werden anschließend in Form einer gegenüberstellenden Alternativrechnung aufgezeigt.

Unter den angeführten Prämissen einer gleichmäßigen gesamtwirtschaftlichen und einer ungestörten energiewirtschaftlichen Entwicklung mit der angegebenen langfristigen Änderung des Energiemarktes ist die End- und Primärenergie-seite des Energieverbrauchs durch das in den Abbildungen 64, 65 und 66 wiedergegebene Modellverhalten charakterisiert.

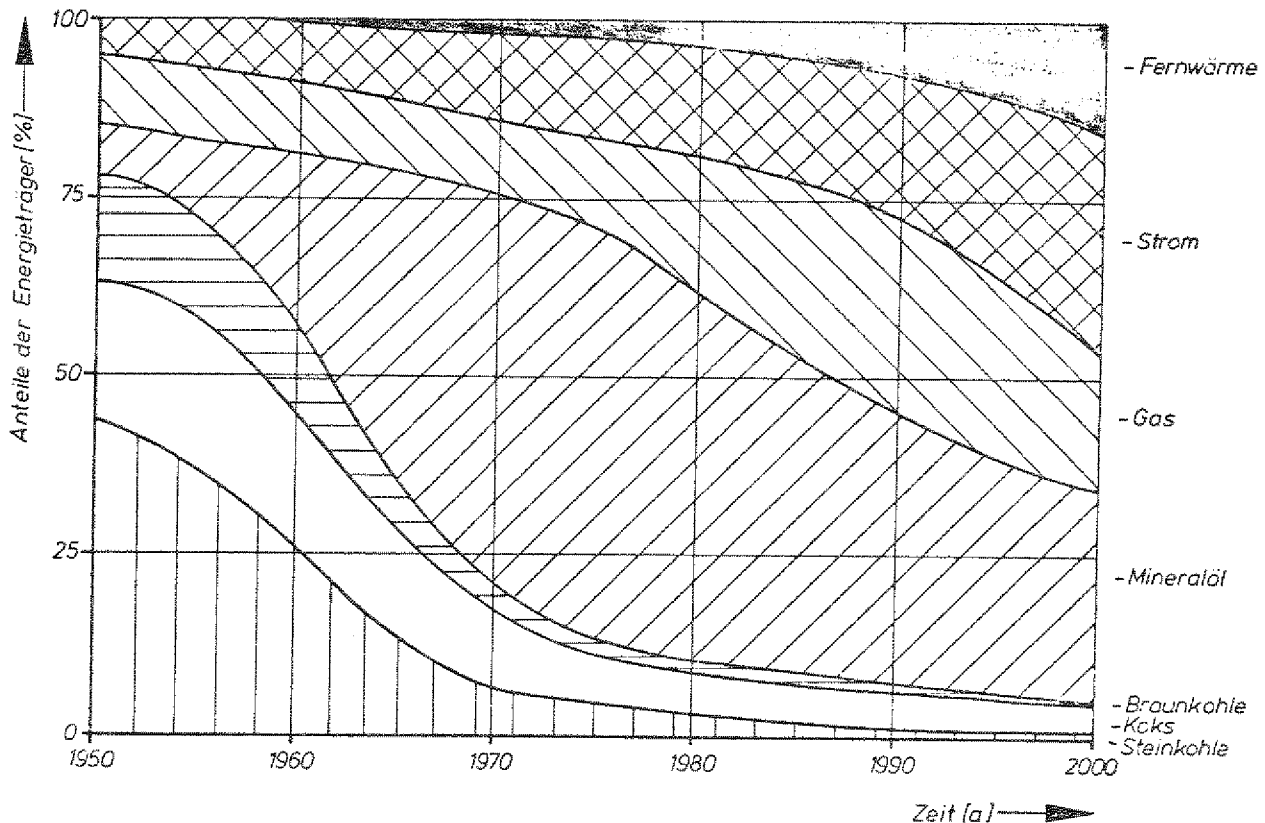


ABB. 64: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern

Die allmähliche Reduzierung des relativen Erdölanteils am Primärenergieverbrauch bis zum Jahre 2000 wird wegen der begrenzten Möglichkeiten der Produktionssteigerung im Kohlebereich (siehe Abschnitt 1) und wegen der langfristigen Lieferverträge für Erdgas - bei dem aus Erschöpfungsgründen kaum eine nennenswerte Aufstockung des Liefervolumens über das für die 80er Jahre be-

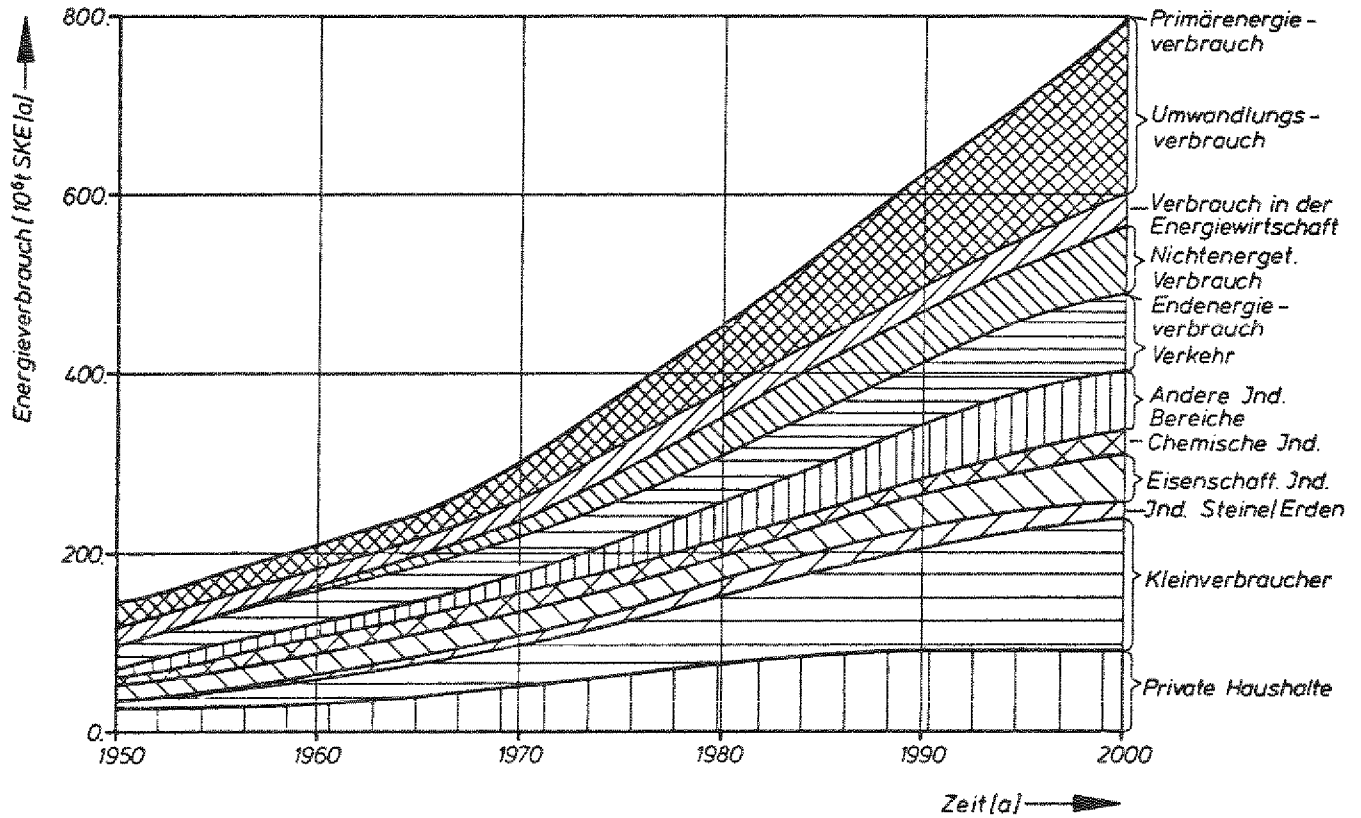


ABB. 65: Struktur des Primärenergieverbrauchs nach Verbrauchsgruppen

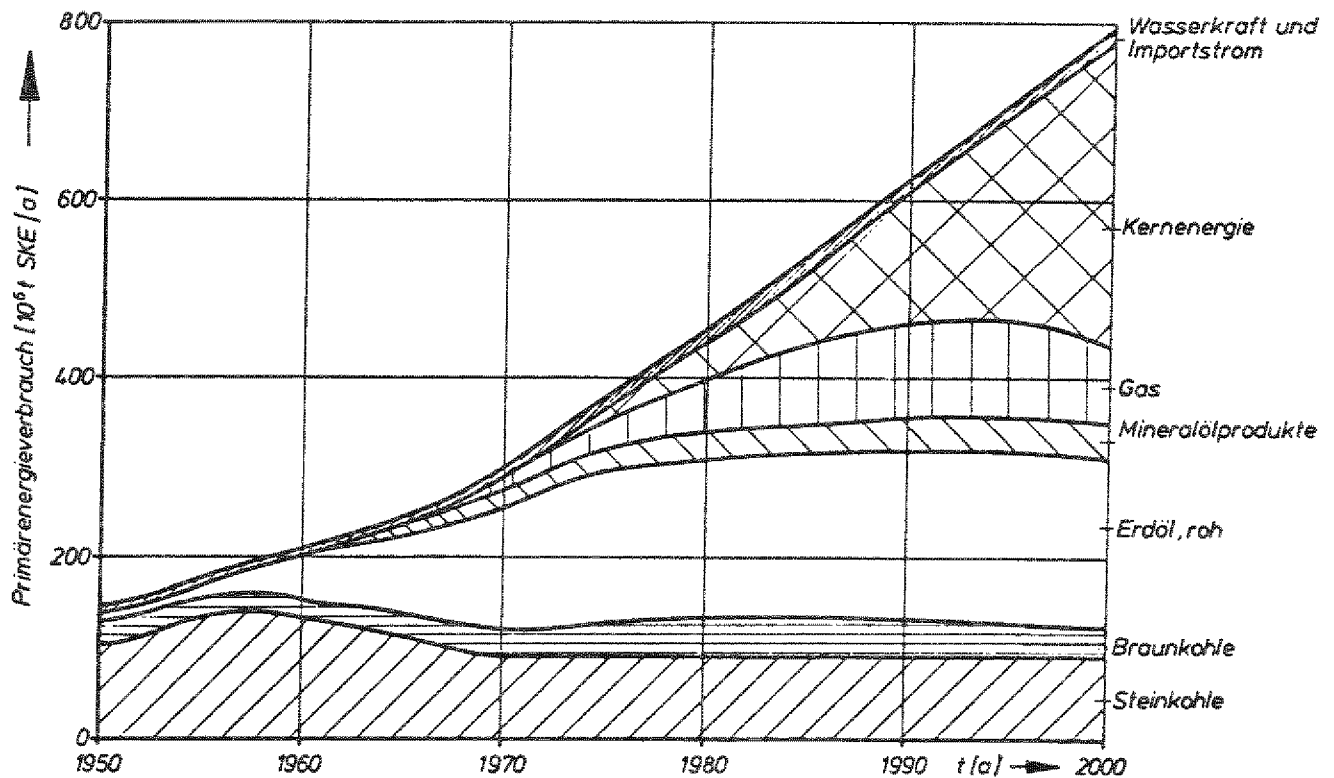


ABB. 66: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern

kannte Maß hinaus möglich sein dürfte - im wesentlichen durch die Verlagerung auf die Kernenergie getragen.

Die Kernenergie - bei der in dieser Strategierechnung nur der Einsatz auf dem Elektrizitätsmarkt betrachtet wird - bringt daher große Strukturänderungen im Kraftwerkssektor mit sich. Wie in Abb. 67 dargestellt ist, wird der nukleare Anteil an der Stromerzeugung - unter der Voraussetzung des für eine kontinuierliche ungestörte Energieversorgung notwendigen unverzügerten Kapazitätsausbaus - 1985 etwa 50 % und im Jahre 2000 nahezu 80 % betragen.

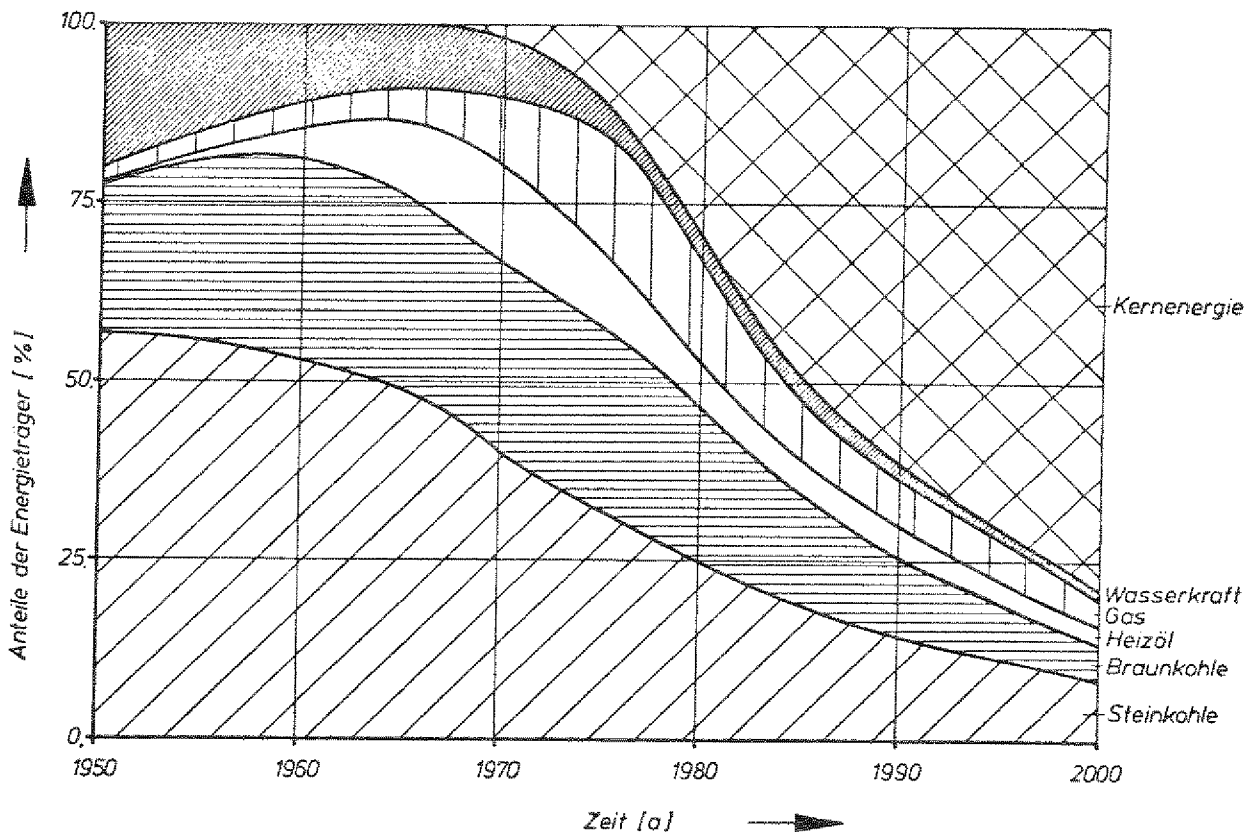


ABB. 67: Struktur der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern

Die mit dem Strukturwandel in der Energieversorgung verbundene Veränderung in der Abhängigkeit von Energieimporten ist in Abb. 68 wiedergegeben. Insgesamt gesehen wird also die Einfuhrabhängigkeit der BRD, die in der vorliegenden Rechnung durch

$$q_j = \frac{I_j - E_j}{\sum_{j=1}^k v_j}$$

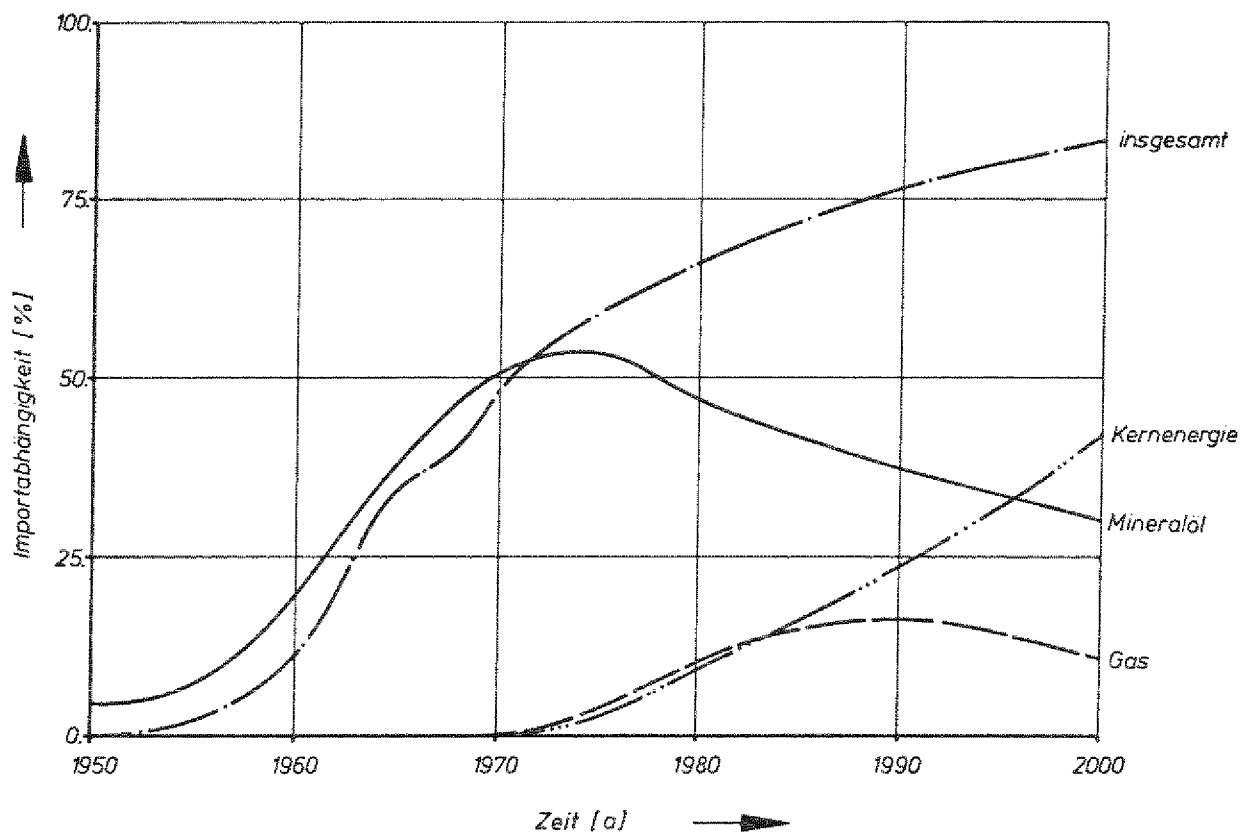


ABB. 68: Entwicklung der Importabhängigkeit nach Energieträgern

mit I_j = Einfuhrmenge des Energieträgers j
 E_j = Ausfuhrmenge des Energieträgers j
 V_j = Primärenergieverbrauch des Energieträgers j

definiert ist, ständig zunehmen. Nur ist das mit dieser Abhängigkeit verbundene Versorgungsrisiko wegen der unterschiedlichen Versorgungsstruktur im Jahre 2000 ganz anders zu bewerten als im Jahre 1975.

Denn Kernbrennstoffe sind aufgrund der hohen Energiedichte und den daraus resultierenden günstigen Lagerungs- und Transportbedingungen, außerdem wegen der globalen Verteilung der Uran- und Thoriumvorräte über politisch relativ stabile Gebiete (siehe Abschnitt 1.3.2) vom Standpunkt der Versorgungssicherheit den fossilen Energieträgern weitaus vorzuziehen.

Bis zum Jahre 2000 dürften die heute in der Bundesrepublik Deutschland bekannten Erdöl- und Erdgasquellen völlig versiegt sein, wenn man vom heutigen Stand der Reservebewertung ausgeht und das derzeitige jährliche Produktionsvolumen

in etwa beibehält (Abb. 69). Die Chancen für Neuentdeckungen an flüssigen und gasförmigen Energieträgern in der BRD (einschließlich deutsches Nordseeschelfgebiet) sind gering, wie intensive Prospektionsarbeiten in den letzten Jahren gezeigt haben (siehe Abschnitt 1.3.2). Die sicheren, wirtschaftlich abbauwürdigen Stein- und Braunkohlevorräte werden sich hingegen unter den simulierten Verbrauchsbedingungen selbst bei einer pessimistischen Bewertung der Vorräte ($5 \cdot 10^9$ tSKE Braunkohle einschließlich Hambacher Revier, $9 \cdot 10^9$ tSKE Steinkohle - vgl. dazu Abschnitt 1) nicht entscheidend dezimieren (Abb. 70).

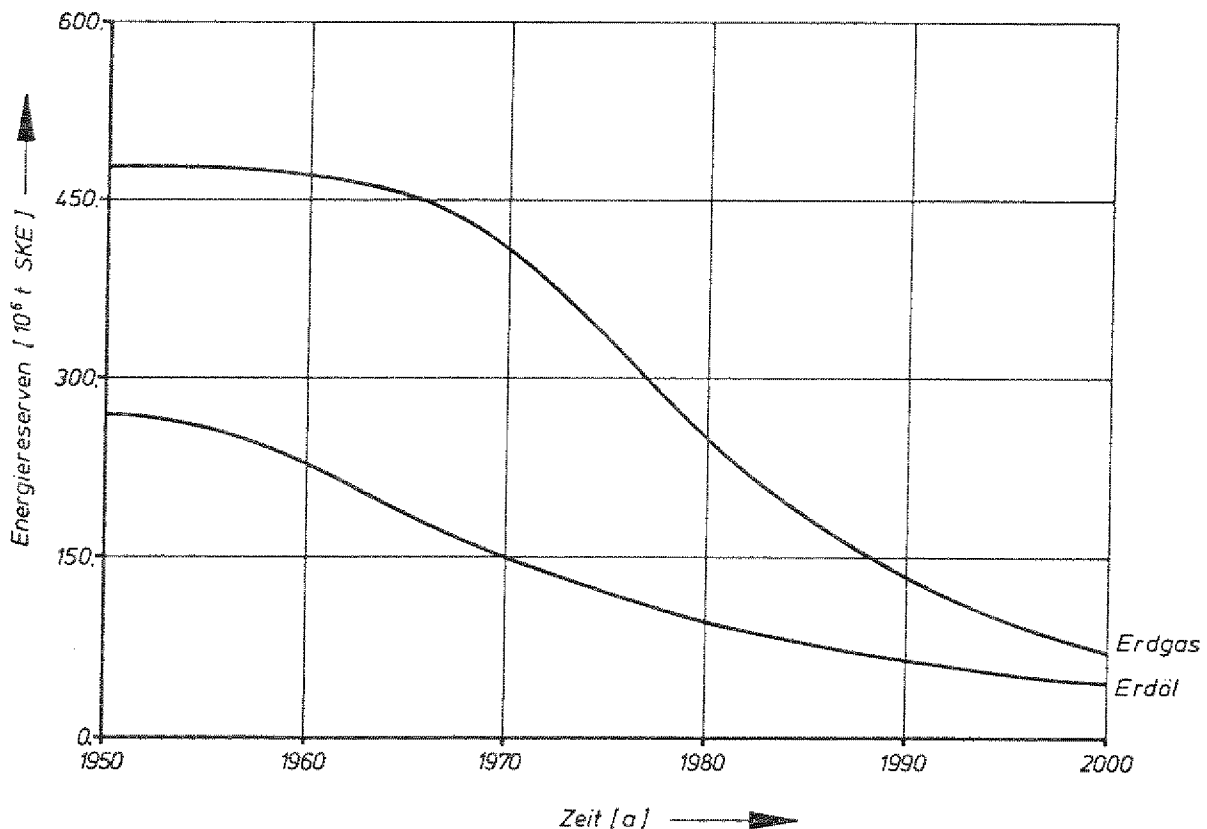


ABB. 69: Entwicklung der Erdöl- und Erdgasreserven in der BRD

Die investiven Aufwendungen für die Bereitstellung der von den Verbrauchern geforderten Energiemengen werden aufgrund steigender spezifischer Investitionskosten im Erzeugungs-, Umwandlungs- und Verteilungsbereich (wie in Abschnitt 3.3.4 näher begründet ist) und wegen des höheren Selbstversorgungsgrades schneller zunehmen als die Nachfrage (Abb. 71).

Stellt man dem Volumen der energiewirtschaftlichen Investitionen die Aufwendungen für die Energieeinfuhr gegenüber (Abb. 72), so zeigt sich, daß die BRD

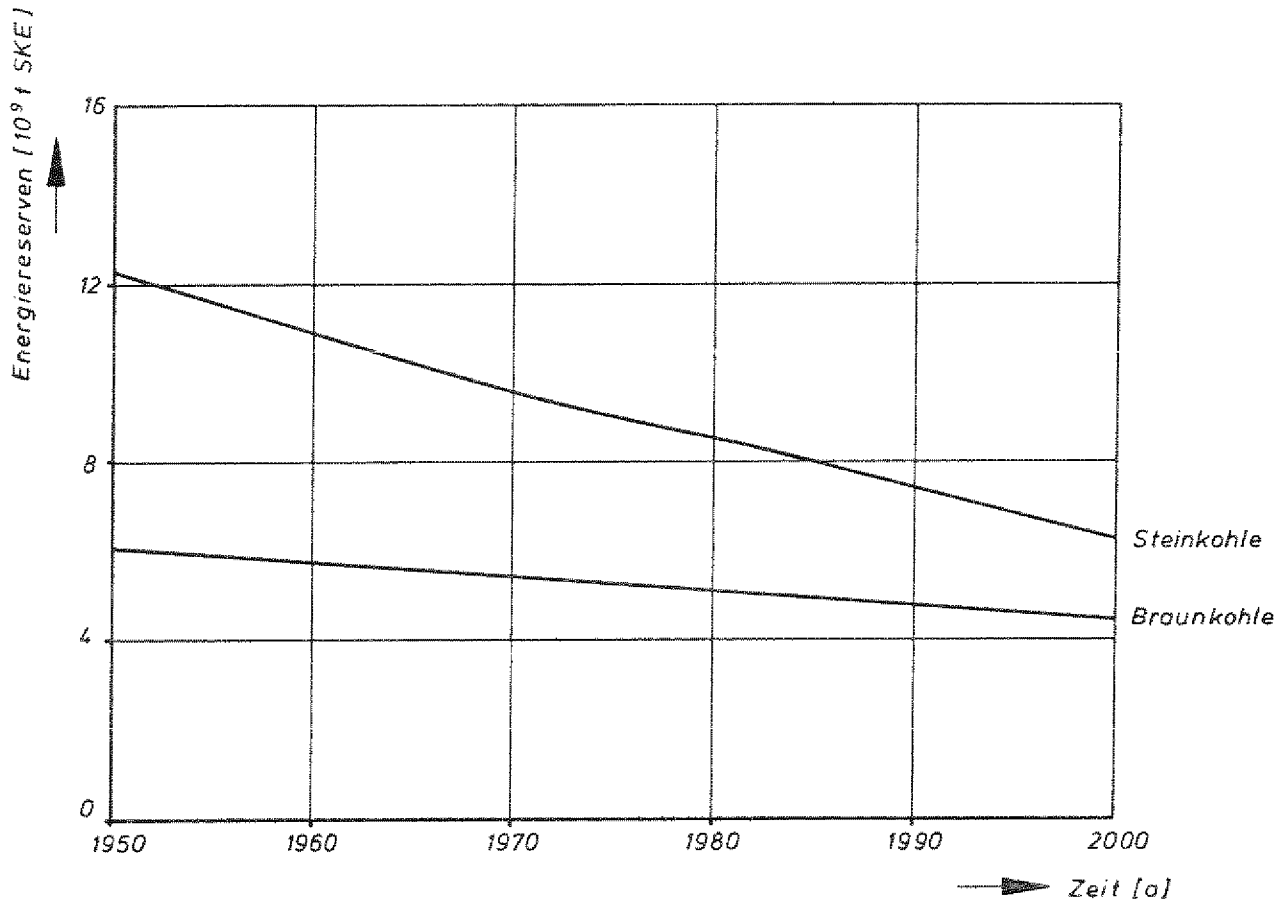


ABB. 70: Entwicklung der wirtschaftlich abbauwürdigen Steinkohle- und Braunkohlereserven in der BRD

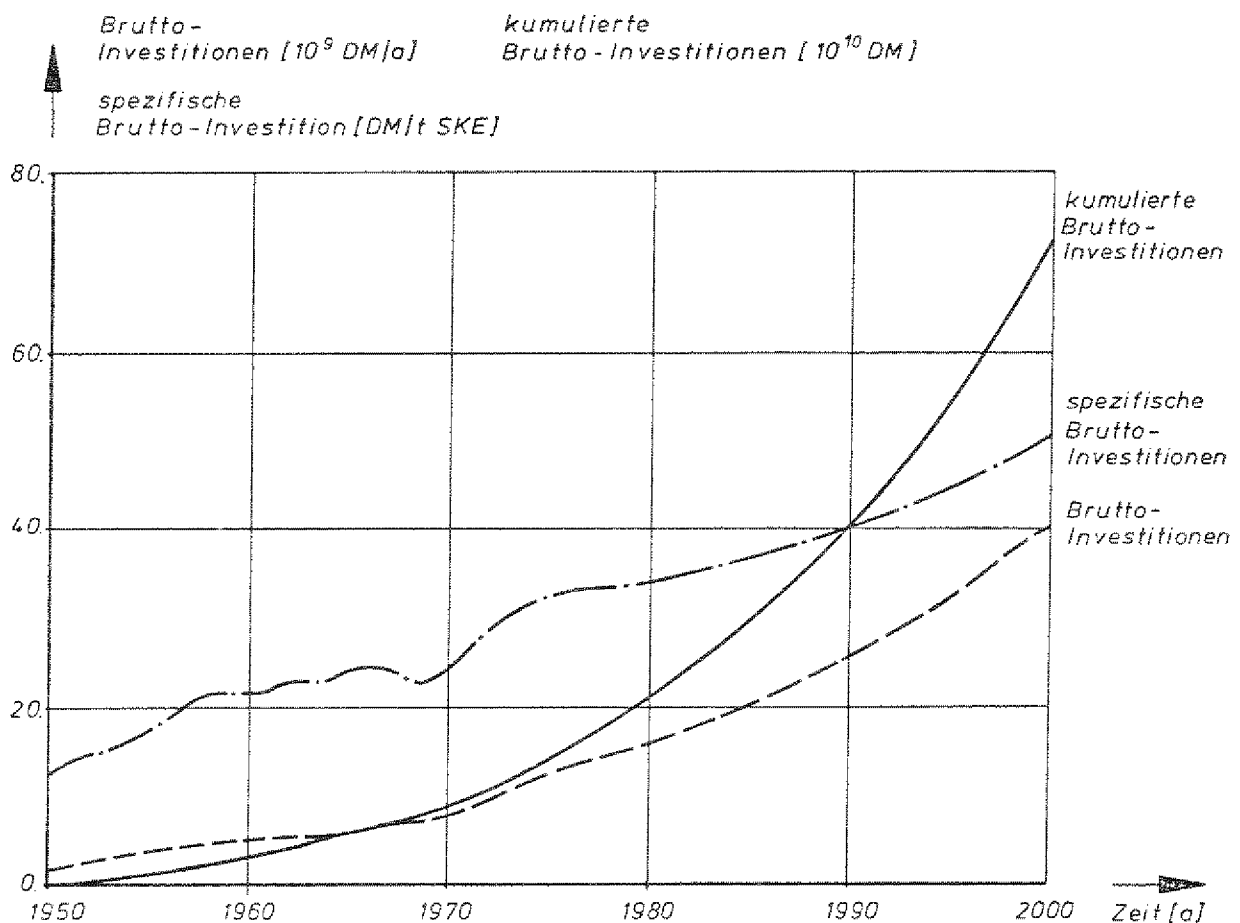


ABB. 71: Brutto-Investitionen, kumulierte Brutto-Investitionen und spezifische Brutto-Investitionen als Funktion der Zeit (in jeweiligen Preisen, ab 1974 konstante Preisbasis)

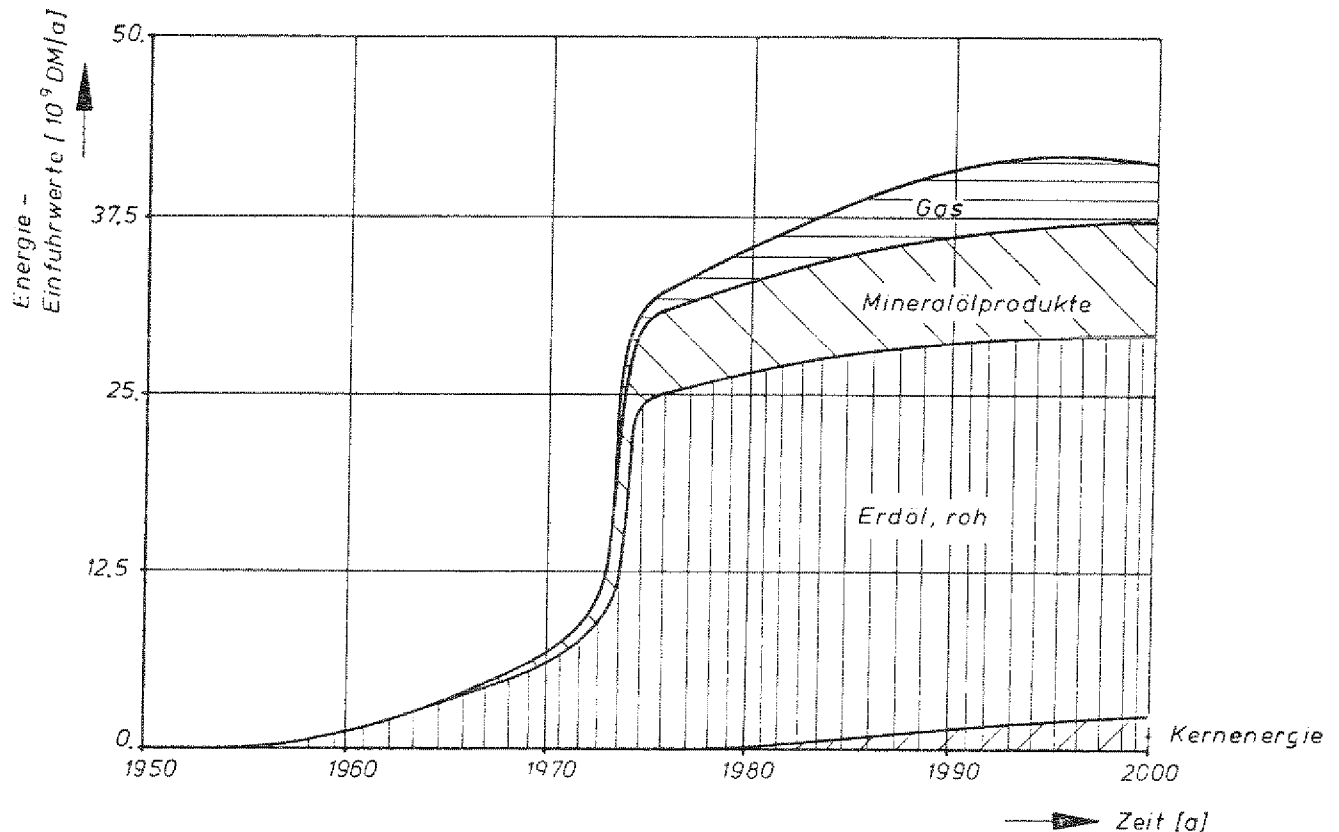


ABB. 72: Entwicklung der Einfuhrwerte für Energie
(in jeweiligen Preisen, ab 1974 konstante Preisbasis)

bis zum Zeitpunkt der sprunghaften Ölverteuerung - im Winter 1973/74 jährlich etwa genausoviel für die Importe von Erdöl, Mineralölprodukten und Erdgas ausgegeben hat, wie im gleichen Zeitraum durchschnittlich insgesamt in Anlagen für die inländische Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Energie investiert wurde. Dieses Verhältnis hat sich allerdings inzwischen so umgekehrt, daß von den Ausgaben, die 1974 etwa $43 \cdot 10^9$ DM betragen haben, 30 % auf Investitionen der Energiewirtschaft und die restlichen 70 % auf Energieeinfuhren entfallen.

Über die zukünftige Entwicklung der Energiepreise auf dem Weltmarkt können nur Vermutungen angestellt werden, denn die autonomen, teilweise irrational motivierten Entscheidungen der Produzentengruppen können nicht prognostiziert oder ex ante berechnet werden, solange dahinter kein Mechanismus erkennbar ist. Es kann jedoch als wahrscheinlich hingenommen werden, daß das derzeitige Energiepreisniveau nicht mehr nennenswert absinken wird. Denn bei weiter steigendem Weltenergiebedarf wird das zur Verfügung stehende Energieangebot trotz des schärfer werdenden Wettbewerbs der Energieträger untereinander auch zukünftig knapp sein, wenn man von regionalen und kurzfristigen saisonalen Schwan-

kungen absieht (siehe hierzu Abschnitt 1). Unterstellt man, daß die Einfuhrpreise der für die BRD derzeitig wichtigsten importierten fossilen Energieträger, Erdgas, Erdöl und Mineralölprodukte, auf dem Niveau der Preise des ersten Halbjahres 1974 konstant bleiben würden, so errechnen sich allein für die Einfuhr dieser Energieträger etwa $1100 \cdot 10^9$ DM kumulierte Energieausgaben bis zum Jahre 2000, wie aus Abb. 73 hervorgeht. (Zum Vergleich: das Bruttoinlandsprodukt des Jahres 1974 betrug $995 \cdot 10^9$ DM).

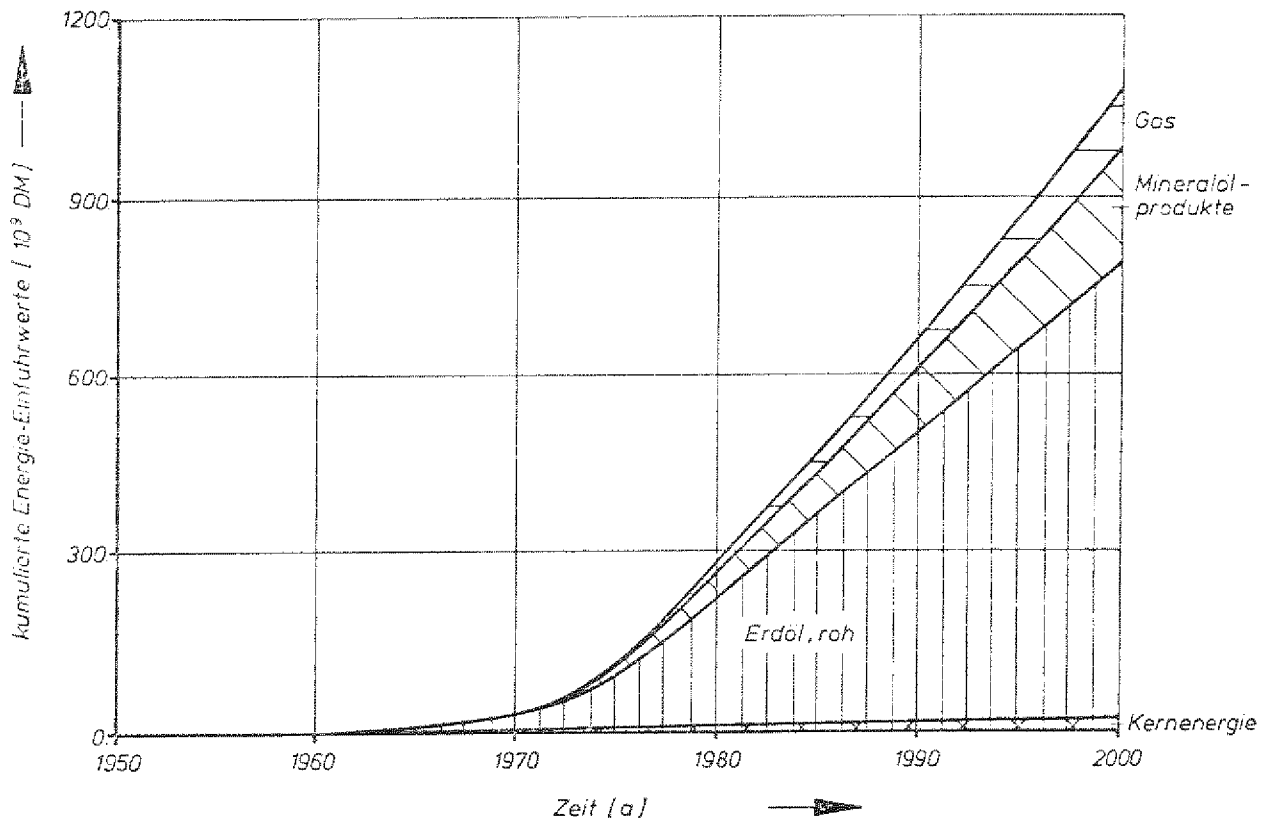


ABB. 73: Kumulierte Einfuhrwerte für Energie
(in jeweiligen Preisen, ab 1974 konstante Preisbasis)

Auf der Kernenergieseite stehen diesen großen Aufwendungen, die mit entsprechend hohen Devisenabflüssen gleichzusetzen sind, bis zum Jahre 2000 kumulierte Ausgaben von ca. $26 \cdot 10^9$ DM gegenüber – wenn man die gleiche Prämisse vorausschickt und die Preise für Kernbrennstoffe auf der Preisbasis des ersten Halbjahres 1974 konstant hält⁽¹⁾. Dabei sind die Anteile der eingeführten Ener-

(1) Nimmt man, um auf der sicheren Seite zu liegen, den für die Brennstoffausnutzung ungünstigen Fall an, daß nur Leichtwasserreaktoren gebaut würden, so ergibt sich folgendes Bild:
Für Leichtwasserreaktoren errechnet sich ein Kernbrennstoff-Äquivalenzpreis von 7,60 DM/tSKE, wenn man einen spezifischen Uranbedarf von 165 kg U-nat/MW·8760h /17/ sowie einen Uranpreis von 7,65 \$/lb U₃O₈ /126/ zugrundelegt und mit 2,50 DM/\$ umrechnet. In dieser Rechnung sind die Kosten des Erst-Inventars nicht berücksichtigt.

gieträger am Primärenergieverbrauch bei Erdgas, Erdöl und Mineralölprodukten von 57,6 % im Jahre 1975 auf 40,6 % im Jahre 2000 gesunken, während sie bei Kernbrennstoffen im gleichen Zeitraum von 2,8 % auf 42,6 % gestiegen sind. Trotz des wachsenden Versorgungsanteils der Kernenergie würde selbst eine Verdopplung, Verfünffachung oder Verzehnfachung des Preises für Kernbrennstoffe nicht zu einem die Volkswirtschaft so stark belastenden Devisenabfluß führen, wie dies auf der Öl- und Gasseite der Fall ist.

4.3 Modellverhalten unter speziellen Bedingungen

4.3.1 Variation der gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten

Wie im vorangegangenen Abschnitt ausgeführt wurde, ist das gesamtwirtschaftliche Wachstum von einer Vielzahl zusammenwirkender Faktoren abhängig, die im einzelnen nicht für einen ferneren Zeitraum determiniert werden können. Es wurde daher von bestimmten Annahmen über die wirtschaftliche Entwicklung ausgegangen. Sie sollen im folgenden modifiziert werden, um das Verhalten des abgebildeten Systems bei veränderten äußeren Bedingungen zu zeigen. Dabei gelten für die Energieversorgungsseite dieselben Prämissen wie im Abschnitt 4.2. Variiert man die Wachstumsbedingungen durch Beeinflussung der unternehmerischen Investitionsentscheidungen⁽¹⁾ im Hinblick auf ein vorgegebenes gewünschtes Wachstum, so ergibt sich im Falle einer Beschleunigung des Wachstums die Entwicklung gemäß Abb. 74, während sich im Falle einer Reduktion des Wachstums das in Abb. 75 gezeigte Verhalten einstellt.

Die Gegenüberstellung der Wachstums- und Energieverbrauchswerte dieser beiden repräsentativen Beispiele bestätigt die Erkenntnis, daß zwischen der wirtschaftlichen Entwicklung und dem Energieverbrauch unserer Volkswirtschaft ein enger, unverrückbarer Zusammenhang besteht. So würde der Primärenergieaufwand des Jahres 2000 bei einem Durchschnittswachstum des Bruttoinlandsprodukts von 5 % ab 1975 auf annähernd $1100 \cdot 10^6$ tSKE ansteigen (Abb. 74), während er bei einer ab 1975 bis zum Jahre 2000 allmählich von 3 % auf 0 % absinkenden durchschnittlichen Wachstumsrate der Wirtschaft im Jahre 2000 knapp $450 \cdot 10^6$ tSKE ausmachen würde, also nur um etwa 20 % über dem derzeitigen Verbrauch (1973: $378,6 \cdot 10^6$ tSKE) liegen würde (Abb. 75).

Da die Produktion einer Volkswirtschaft an Gütern und Dienstleistungen nicht nur vom Inlandsmarkt und der inländischen Nachfrage abhängt, sondern auch vom Export- und Importmarkt bzw. von der Nachfrage und den Lieferungen des Auslands bestimmt ist, sind bei einer Analyse des Wachstumsverhaltens auch die

(1) Investitionsanreize mit Hilfe von Investitionsprämien, Steuererleichterungen, Zinssenkungen, Öffentlichen Aufträgen etc.; Investitionshemmnisse mit Hilfe von Investitionssteuern, Verringerung der Abschreibungsgeschwindigkeit, Zinserhöhungen etc.

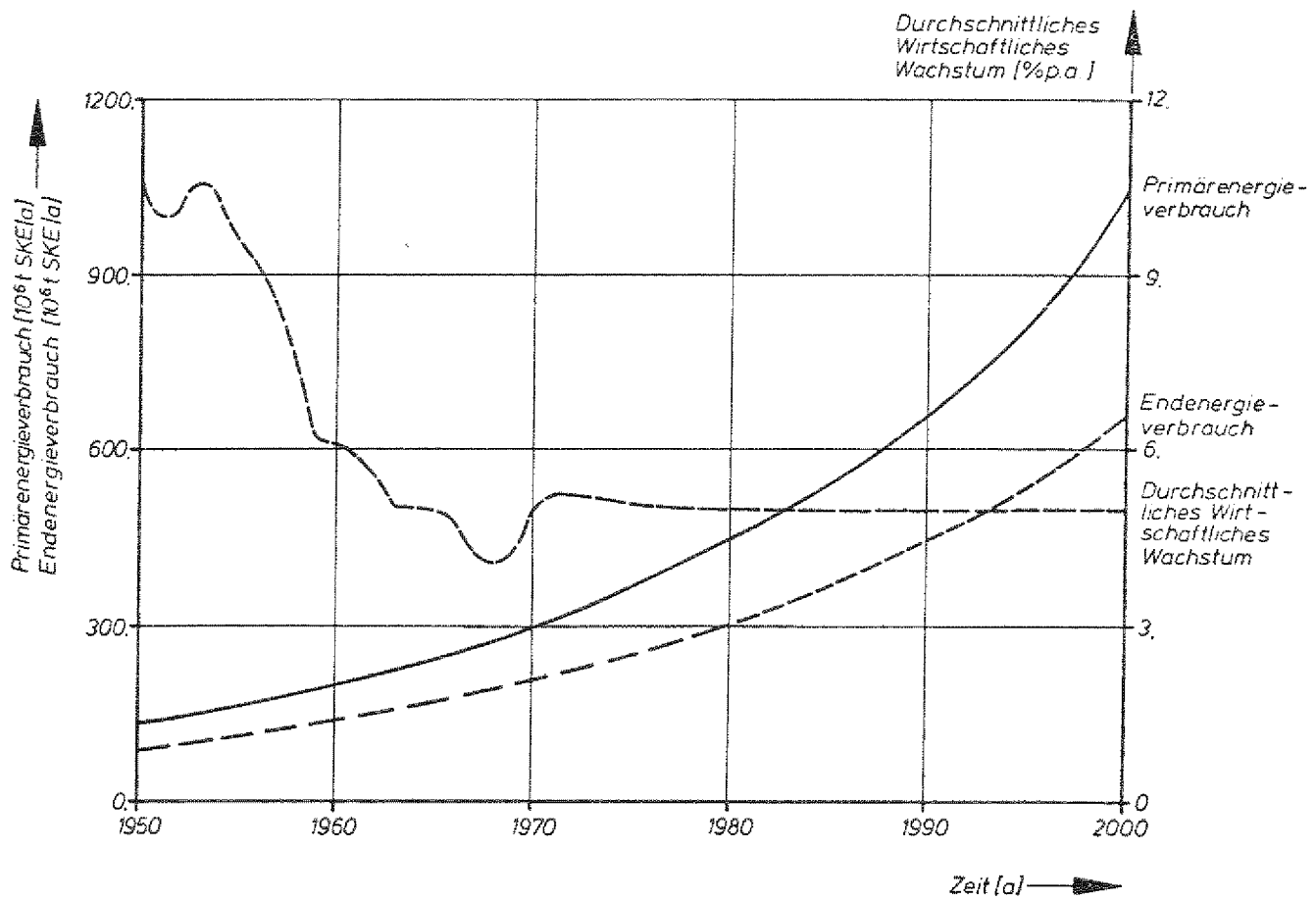


ABB. 74: Entwicklung des Energieverbrauchs im Falle eines beschleunigten Wirtschaftswachstums

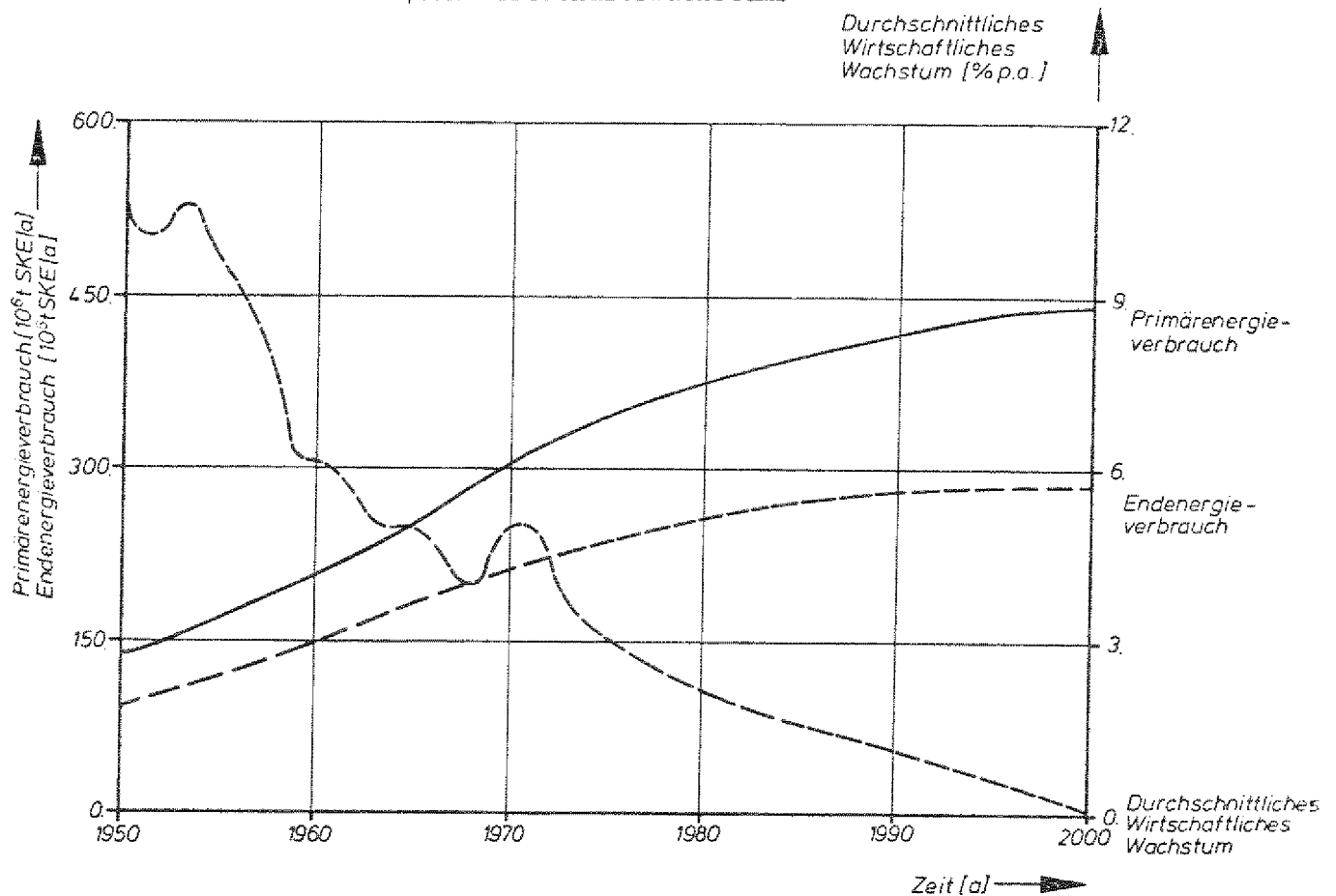


ABB. 75: Entwicklung des Energieverbrauchs im Falle eines verzögerten Wirtschaftswachstums

möglichen Auswirkungen veränderter Außenhandelsstrukturen zu untersuchen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß über die zukünftige Preisentwicklung des Inlands wie des Auslands, über mögliche Wechselkursänderungen, über die Entstehung oder Beseitigung von besonderen Handelsbeziehungen (Handelsblöcke, Handelspräferenzen oder -restriktionen etc.) und folglich über die künftige Wettbewerbsposition der deutschen Wirtschaft auf dem Weltmarkt und der ausländischen Wirtschaften auf dem deutschen Markt zumindest auf längere Sicht keine eindeutigen Aussagen gemacht werden können. Daher sind hier Hypothesen und Sensibilitätsanalysen erforderlich, um anzugeben, wie das abgebildete System auf veränderte Außenhandelsstrukturen reagiert. Im folgenden wird untersucht, wie sich das gesamtwirtschaftliche Wachstum bei veränderten Export- und Importquoten (= Export/Bruttoproduktion bzw. Import/Bruttoproduktion), jedoch unter sonst gleichen Bedingungen wie im Standardfall, verschiebt. Dabei soll nur die volumenmäßige, nicht die wertmäßige Veränderung betrachtet werden, d.h. es werden sämtliche Preiseffekte ausgeklammert, und es wird auf Basis heutiger Wettbewerbsbedingungen gerechnet. Zusätzlich sind aus Gründen der Gleichartigkeit der Voraussetzungen die für eine kontinuierliche ungestörte Energieversorgung erforderlichen Nettoimporte von Energie bei der Veränderung der Außenhandelsstrukturen ausgeschlossen worden. Unter Export- bzw. Importquoten werden also an dieser Stelle in Preisen von 1962 angegebene, auf die Bruttoproduktion bezogene Kennziffern des Ausfuhr- und Einfuhrvolumens der Gesamtwirtschaft ohne Energiewirtschaft verstanden. Abb. 76 zeigt die zeitliche Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Wachstumsraten für drei unterschiedlich angenommene Importquoten, wobei der Parameter κ das durchschnittliche Verhältnis von Import- zu Exportvolumen der Gesamtwirtschaft ohne Energiewirtschaft angibt.

Würden die so definierten Importe zukünftig volumenmäßig 30 % der Exporte ausmachen ($\kappa = 30\%$), so ergäbe sich gegenüber dem Standardfall mit $\kappa = 60\%$ ein größeres Wachstum, da die inländische Wirtschaft die fehlenden Auslandslieferungen bei gleichbleibender Nachfrage durch eine stärkere eigene Produktion kompensieren müßte. Bei einem nahezu ausgeglichenen Außenhandel ($\kappa = 90\%$) würde sich dagegen das Wachstum reduzieren. Allerdings sind die Abweichungen bei veränderten Importquoten gering, so daß von einer relativen Unempfindlichkeit des Wirtschaftswachstums in bezug auf die Veränderung des Importvolumens gesprochen werden kann, wenn man - wie hier geschehen - eine Vergleichsbetrachtung auf Basis konstanter Preise und zu heutigen Wettbewerbs-

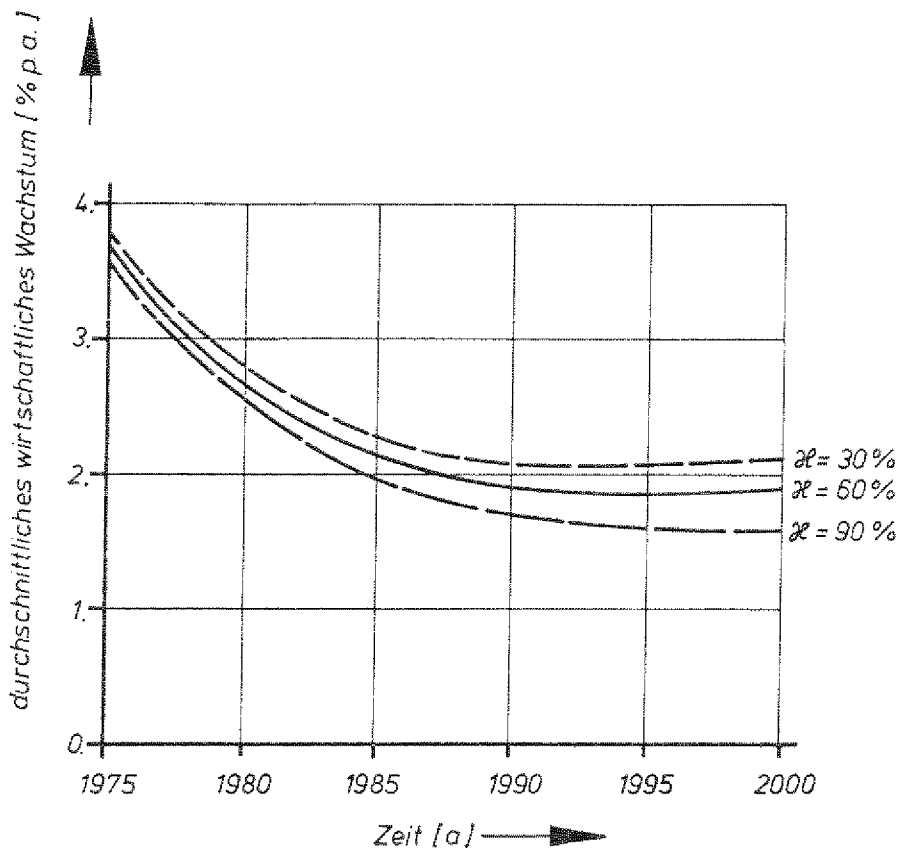


ABB. 76: Entwicklung des Wirtschaftswachstums bei unterschiedlichen Importquoten

bedingungen aufstellt und weitere Folgewirkungen (wie z.B. Finanzierungs- und Zahlungsbilanzprobleme bei erhöhten Importen) vernachlässigt.

Etwas anders sieht dagegen das Verhalten bei einer Veränderung der Exportquoten aus, wie aus Abb. 77 ersichtlich ist. Eine Vergrößerung der Exportquote q ($q = 45\%$) oder eine Verkleinerung ($q = 5\%$) im Vergleich zum Standardfall ($q = 12\%$) würde die Wachstumsgeschwindigkeit sehr deutlich vergrößern bzw. verringern (Abb. 77).

Aus diesen Sensibilitätsanalysen wird deutlich, daß langfristig nur dann ein großes Wachstumspotential existiert, wenn die Exportquote wie derzeitig etwa 12% beträgt oder darüber liegt. Das Ziel einer Steigerung des Lebensstandards kann daher nur erreicht werden, wenn die BRD bei stärker werdendem Wettbewerb auf dem Weltmarkt in großem Umfang technologisch hochentwickelte und hochwertige Güter und Dienstleistungen exportiert, um einerseits die begrenzten inländischen Expansionsmöglichkeiten durch einen vergrößerten Weltmarktabsatz aufzufangen und andererseits, um die lebensnotwendigen Einfuhren von Energie und Rohstoffen durch die eigene Leistungskraft bezahlen zu können.

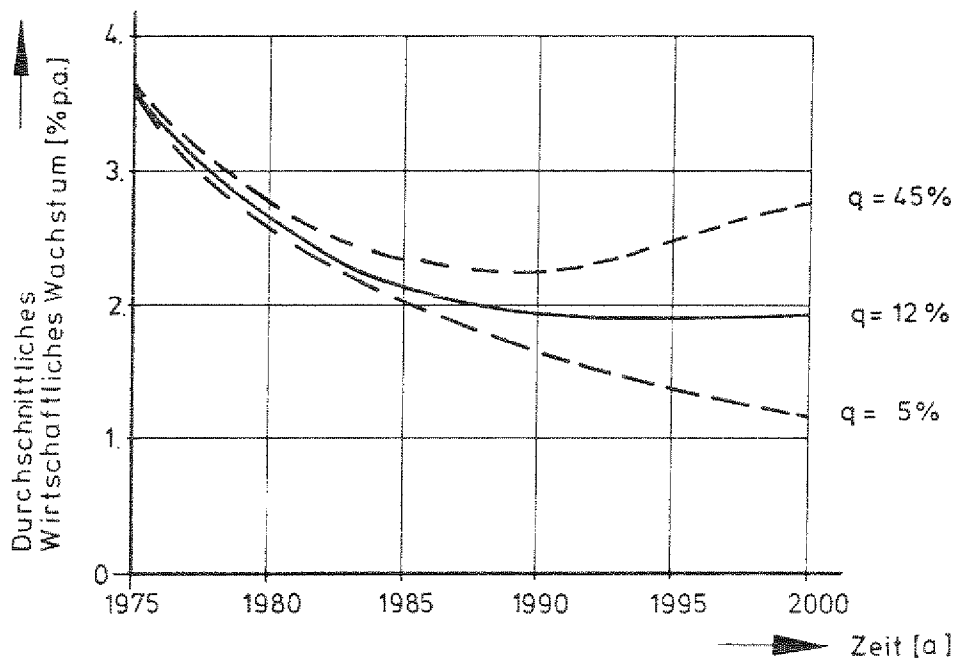


ABB. 77: Entwicklung des Wirtschaftswachstums bei unterschiedlichen Exportquoten

4.3.2 Variation der Verbrauchsbedingungen

Für die analytische Berechnung des Energieverbrauchs in Abschnitt 3 wurden Durchschnittswerte des spezifischen Energieverbrauchs verwendet. Sie sind unter der Annahme eingeführt worden, daß sich die Verbrauchsbedingungen im Mittel nicht ändern, d.h. daß die Temperaturbereiche, die spezifischen Betriebsweisen und -stunden sowie die Umwandlungs- und Verteilungsformen im Energiebereich gleich bleiben. Nicht berührt von dieser Einschränkung werden allerdings die verfahrensbedingten Verbesserungen, die durch technischen Fortschritt in der Energienutzung erzielbar sind (vgl. Abschnitt 3.3.3).

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß die zunächst als gleichbleibend angesehenen Verbrauchsbedingungen Veränderungen unterliegen, wenn Impulse, die z.B. von Energiepreisanhebungen bzw. -senkungen oder von einer Änderung des zur Verfügung stehenden Energieangebots ausgehen können, wirksam werden. Denn der Verbraucher wird sein Verhalten an die veränderten äußeren Bedingungen anzupassen suchen - rationales Handeln unterstellt. Aus der Vielzahl möglicher Veränderungen der Verbrauchsbedingungen soll hier ein Effekt herausgegriffen werden, der die Energieeinsparungen durch Verbesserung der Maßnahmen zur Wärmedämmung im Raumheizungswärmebereich der Haushalte und Kleinverbraucher betrifft.

Nach Angaben von /109/ ist der Jahreswärmebedarf für den Durchschnitt der Wohnungen in der BRD derzeit mit $0,654 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{a}$ anzusetzen, während bei einer optimalen Wärmedämmung mit einem Jahreswärmebedarf von nur $0,467 \text{ GJ/m}^2 \cdot \text{a}$ zu rechnen ist. Das bedeutet, daß bei einer Bauweise mit Vollwärmeschutz rund 30 % an Raumheizungsenergie eingespart werden könnte. In der in Abb. 78 dargestellten Strategierechnung ist die Einführung einer derart optimalen Wärmedämmung in Neu- und Altbauten von 1975 an mit einer Übergangszeit bis zum Jahre 1985 simuliert worden.

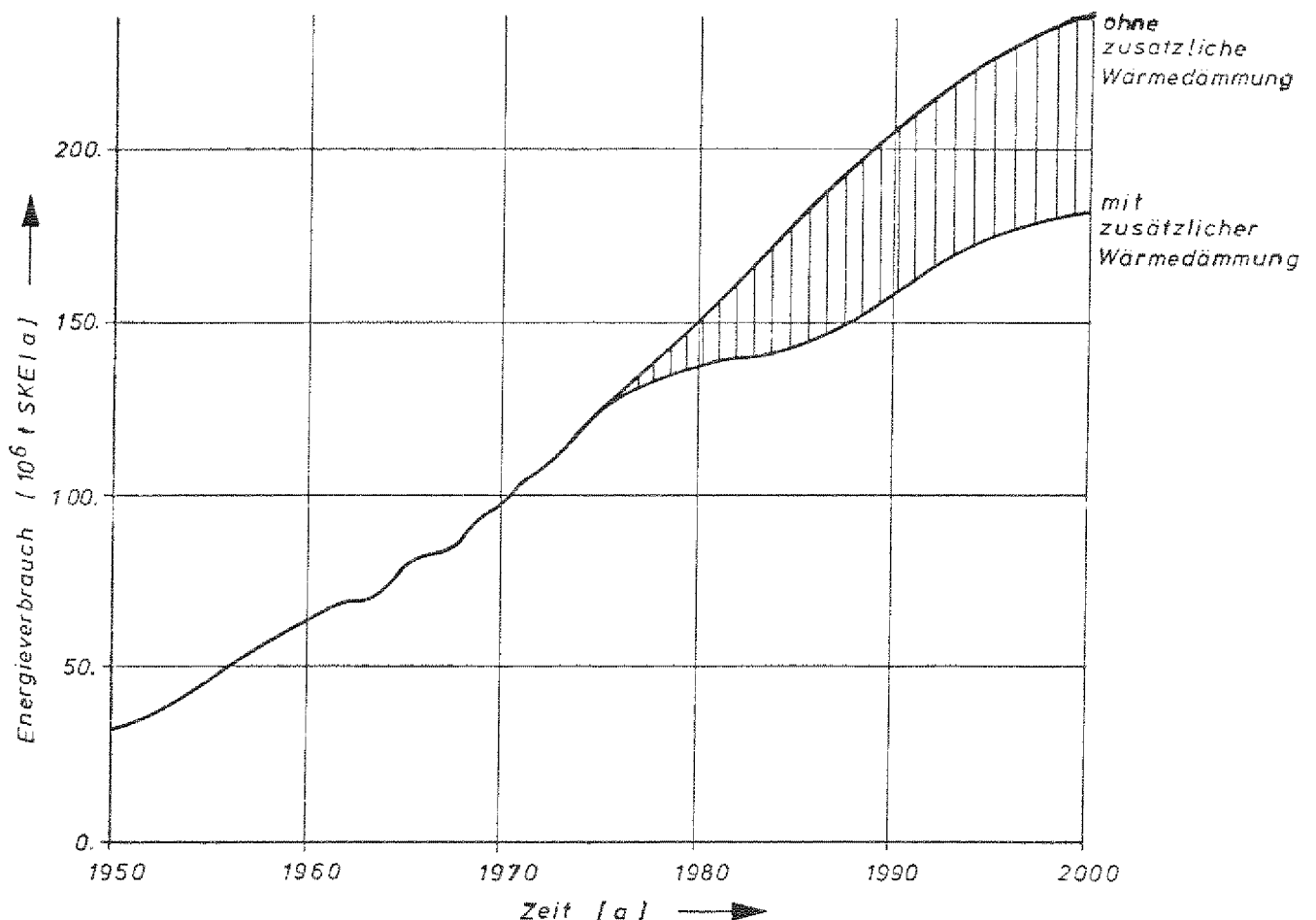


ABB. 78: Endenergieverbrauch im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher mit und ohne zusätzlichen Maßnahmen zur Wärmedämmung

Die auf diese Weise erzielbaren Einsparungen im Energieverbrauch würden bereits im Jahre 1985 etwa $40 \cdot 10^6$ tsKE, im Jahre 2000 ca. $60 \cdot 10^6$ tsKE jährlich ausmachen. Allerdings dürfte auch ein energetischer Mehraufwand für die Produktion von Wärmedämm-Materialien nötig sein. Dieser Effekt ist in der Strategierechnung nicht berücksichtigt worden, da im Produktionssektor nicht die stoffliche Produktion, sondern nur der wertmäßige Ausstoß der Wirtschaftsbereiche bestimmt wird. Dieser Mangel in der Energieverbrauchsrechnung ließe

sich - allerdings mit beträchtlichem Aufwand - durch eine entsprechende produktmäßige Diversifikation des Produktionssektors beseitigen. In der hier diskutierten Strategierechnung geht es jedoch primär darum zu zeigen, wie Veränderungen in den einzelnen Verbrauchsgruppen wirksam werden können.

Dabei gibt das Beispiel der Verbesserung der Wärmeisolation nur eine Maßnahme zur Verringerung des spezifischen Raumheizwärmebedarfs an. Eine andere Möglichkeit der Energieeinsparung besteht z.B. in der Veränderung des Verbraucherverhaltens durch Anheben der Auslöseschwellen für die Beheizung auf höhere Temperaturen oder durch eine optimale Raumtemperaturregelung. Im Hinblick auf die Auswirkungen, d.h. auf die Verringerung des Energieverbrauchs in der betreffenden Gruppe, ist es dabei - bei den der Modellkonzeption eigenen Prämissen - gleichgültig, welche der Maßnahmen die dargestellten Einsparungen erzielt haben.

4.3.3 Variation der Versorgungssituation

In den vorangegangenen Strategierechnungen wurde eine kontinuierliche ungestörte Energieversorgung vorausgesetzt. Es ist jedoch nicht vertretbar - wie in vielen Prognosen geschehen - einfach so zu tun, als könne die Energienachfrage in der Zukunft in jedem Fall und zu jedem Zeitpunkt befriedigt werden. Denn die BRD bleibt - selbst bei einem optimalen bedarfsgerechten Ausbau der inländischen Versorgungskapazitäten - in starkem Maße auf Einfuhren von Primärenergieträgern angewiesen (vgl. Abb. 68), und damit ist die Versorgungssicherheit auch weiterhin direkt vom Verhalten der exportierenden Länder mitabhängig. Selbst wenn man annimmt, daß sich das Versorgungsrisiko durch Veränderung der Versorgungsstruktur nach Energieträgern, durch eine globale Streuung der Bezugsquellen, durch Tauschgeschäfte mit den Lieferländern, durch Nachfragekartelle und andere politische und ökonomische Maßnahmen verringern ließe, so kann doch die Möglichkeit einer von außen ausgelösten Versorgungsstörung nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere beim Erdöl scheint seit dem von den Nah- und Mitteloststaaten politisch entfachten und ökonomisch genutzten Embargo des Winters 1973/74 eine Versorgungskrise latent vorhanden zu sein.

Im vorliegenden Fall sind die Auswirkungen einer im Jahre 1980 schlagartig auftretenden Lieferkürzung von Mineralöl (Erdöl und Mineralölprodukte) als Modellfall untersucht worden. Dabei wurde nur die mengenmäßige Komponente der Störung betrachtet, preisliche Effekte wurden nicht berücksichtigt. Im einzelnen laufen in diesem hypotetischen Krisenfall folgende Phasen ab:

- Die kontrahierten Einfuhrmengen von Erdöl- und Mineralölprodukten werden zu Beginn des Jahres 1980 um ein Drittel verringert. Da keine Ersatzlieferungen aus anderen Ländern erfolgen, ist das Mineralölangebot auf dem Inlandsmarkt um ein Drittel kleiner als die Nachfrage.
- Während einer kurzen Übergangszeit, die durch das Aufbrauchen der Lager bei Verbrauchern, Händlern und Raffinerien gekennzeichnet ist, müssen administrativ Verbrauchsbeschränkungen erlassen werden.
- Annahmen: Der Mineralölabsatz an private Haushalte, Kleinverbraucher und Industrie wird um 38 % reduziert. Die Verkehrsleistung im Individualverkehr wird um 30 %, im öffentlichen Personenverkehr um 10 % verringert. Die Güterverkehrsleistung und die Lieferungen an die Energiewirtschaft werden aus versorgungspolitischen Gründen nicht eingeschränkt. Es wird außerdem unterstellt, daß die Einschränkungen im Personenverkehrsbereich keine weiteren ökonomischen Folgen (wie etwa Mangel an Arbeitskräften wegen Transportschwierigkeiten oder verringertes Wirtschaftswachstum wegen rückgängigen Automobilabsatzes etc.) haben und daß der Verbrauch je Produktionseinheit in der Industrie und bei Kleinverbrauchern dem jeweiligen Stand der Technik entspricht und nicht gesenkt werden kann.

Unter diesen Prämissen werden die aufgeführten administrativen Maßnahmen in dreierlei Weise auf den Energieverbrauch wirken (Abb. 79):

- Im Konsumbereich (private Haushalte) und im Verkehrssektor werden Einsparungen erzielt, die den Bedarf unmittelbar verringern.
- Im Produktionssektor (Industrie, Kleinverbraucher) kann der Verbrauch nur dadurch reduziert werden, daß die Auslastung des Produktionspotentials zurückgenommen wird.
- In allen Verbrauchssektoren laufen gleichzeitig Substitutionsprozesse ab, die die Struktur der Nachfrage nach Energieträgern ändern.

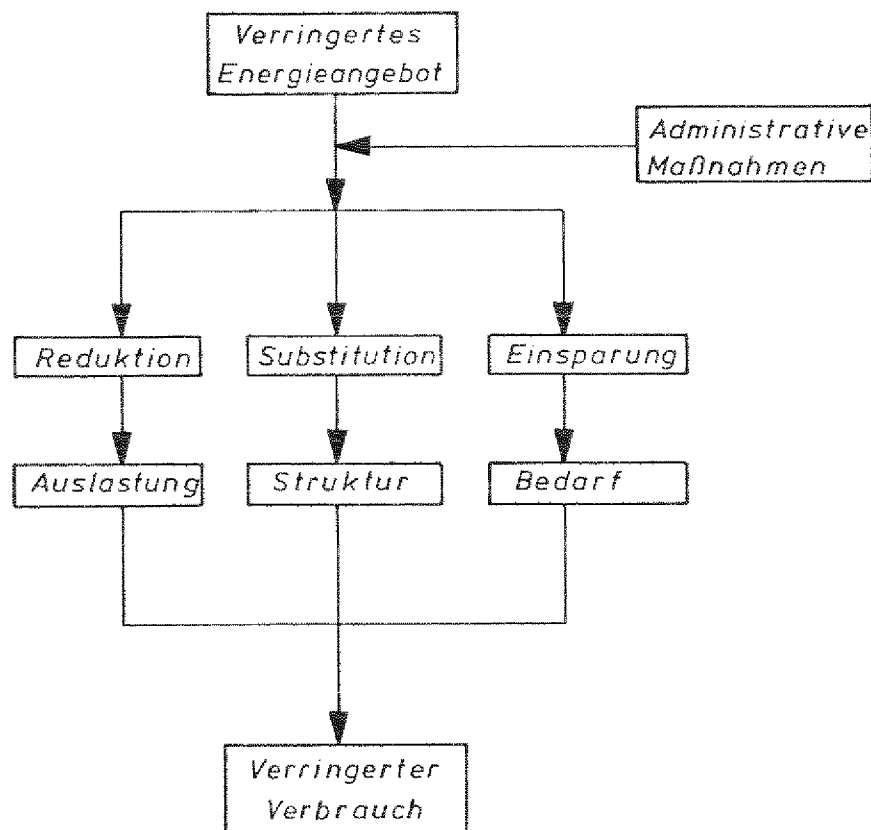


ABB. 79: Direkte und indirekte Wirkungen administrativer Maßnahmen im Falle einer Versorgungskrise

Nimmt man an, daß im Fall einer Versorgungskrise, die Produktionseinschränkungen zur Folge hat, die Substitutionszeiten äußerst kurz sind, so ergibt sich beispielsweise eine Entwicklung, wie sie in Abb. 80 dargestellt ist.

Der Produktionsrückgang wird in der starken Rezession des Bruttoinlandsprodukts nach 1980 sichtbar. Selbst unter der Annahme, daß sofort Substitutionsmaßnahmen ergriffen werden, so daß die Umstellungen, die in der Regel Anlagenveränderungen erfordern, im industriellen Bereich spätestens nach drei Jahren, in allen anderen Bereichen längstens nach fünf Jahren völlig abgeschlossen sind, reagiert das abgebildete System so träge, daß das wirtschaftliche Wachstum erst etwa ein Jahr nach der Störung stabilisiert werden kann. Das Bruttoinlandsprodukt ist innerhalb eines Jahres von ca. $850 \cdot 10^9$ DM auf $700 \cdot 10^9$ DM zurückgefallen; es werden weitere viereinhalb Jahre benötigt, um die vor der Störung jährlich erbrachte volkswirtschaftliche Leistung wieder zu erreichen, da das Wachstum von einem niedrigen Niveau einsetzt. Der am Bruttoinlandsprodukt gemessene direkte volkswirtschaftliche Verlust der Krise würde demnach etwa $150 \cdot 10^9$ DM/a $\cdot 5\frac{1}{2}$ a, entsprechend $850 \cdot 10^9$ DM ausmachen,

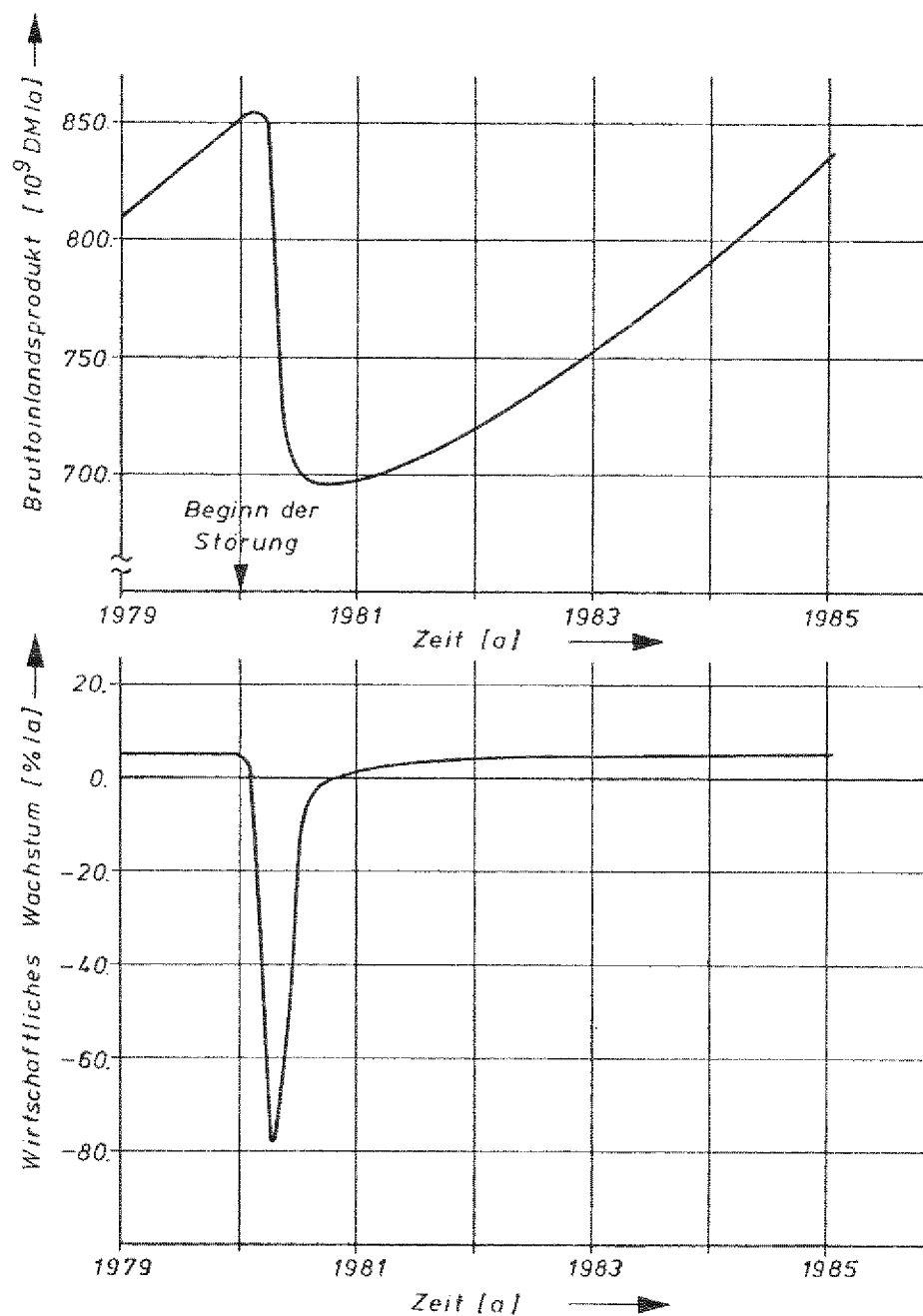


ABB. 80: Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts und des wirtschaftlichen Wachstums (im Vergleich zum Vormonat) bei einer Versorgungskrise

also annähernd der gesamtwirtschaftlichen Leistung des Jahres vor Beginn der Lieferkürzung entsprechen.

4.3.4 Variation der Versorgungsstrukturen

4.3.4.1 Verzögerter Einsatz der Kernenergie

Die den bisher diskutierten Strategierechnungen zugrundeliegende Versorgungsstruktur lehnte sich tendenzmäßig an die durch das fortgeschriebene Energie-

programm /33/ bis 1985 vorgegebene Entwicklung an. Dabei wird ein sehr schnell ablaufender Strukturwandel - Zurückdrängen des Mineralölanteils zugunsten der Kernenergie - unterstellt.

Die Schwierigkeit, geeignete Standorte für Kernenergieanlagen zu finden, die Ausdehnung der Genehmigungsverfahren und Widerstände der Bevölkerung gegen die Kernenergie haben jedoch in der Vergangenheit zum Teil Verzögerungen der Ausbauprogramme mit sich gebracht. Daher kann nicht als gesichert angenommen werden, daß das von den Energiepolitikern angestrebte Ziel - 1985 sollen $81 \cdot 10^6$ tSKE, entsprechend 15 % der Primärenergie, durch die Kernenergie gedeckt werden - tatsächlich auch in der vorgegebenen Zeit erreicht werden kann. Im folgenden wird untersucht, welche alternativen Entwicklungsmöglichkeiten sich bieten, falls die Kernenergie auf dem Elektrizitätsmarkt verzögert zum Einsatz kommt.

In diesem Zusammenhang werden drei verschiedene Fälle mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten durchgerechnet, und zwar mit bleibender dreijähriger und

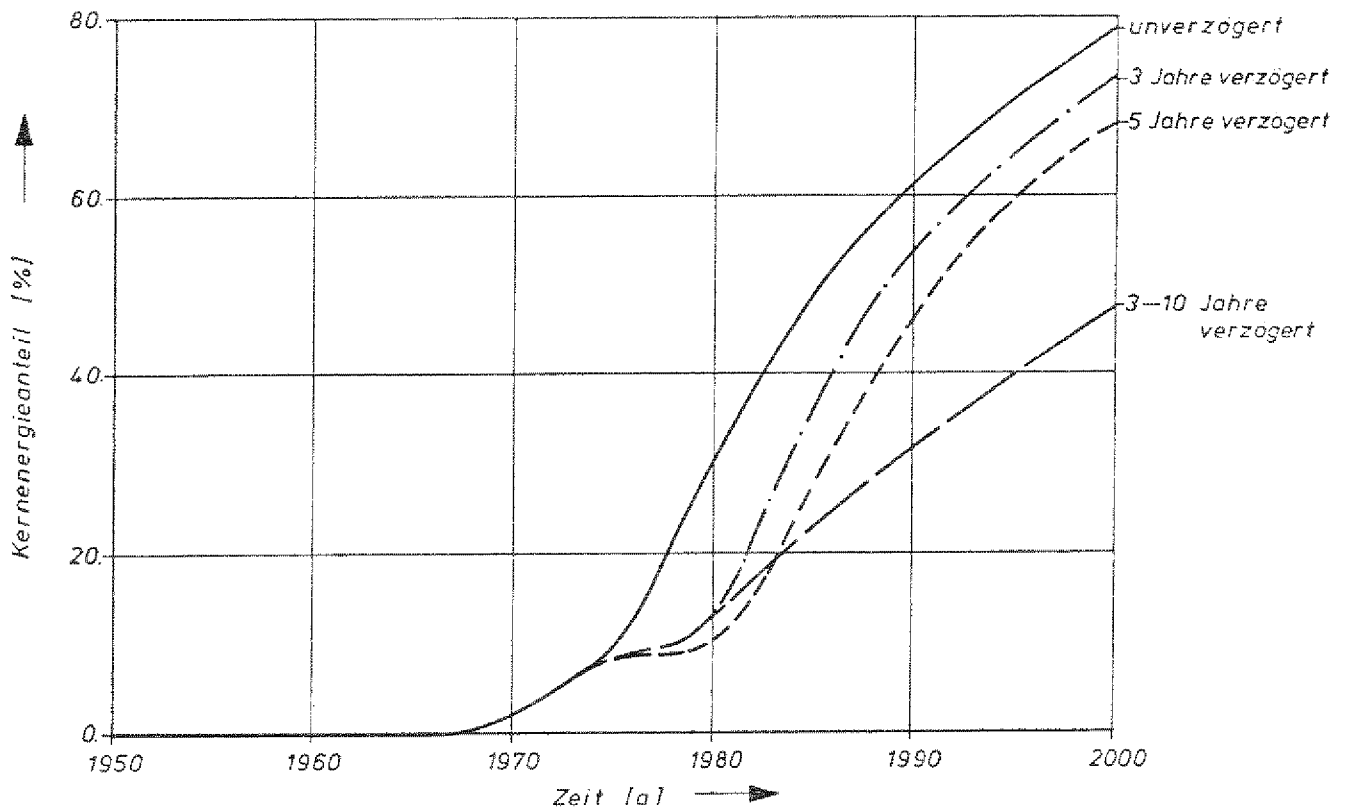


ABB. 81: Anteil der Kernenergie an der Brutto-Stromerzeugung bei unverzögertem und verzögertem Ausbau der Kernkraftwerke

fünffähriger Einsatzverzögerung vom Jahre 1980 an, sowie mit einer zwischen den Jahren 1980 bis 2000 von drei bis auf zehn Jahre zunehmenden Einsatzverzögerung.

Der Rückgang des Kernenergieanteils an der Brutto-Stromerzeugung ist für diese drei Fälle in Abb. 81 sichtbar.

Nimmt man an, daß die heimischen Energiequellen den fehlenden Versorgungsanteil voll übernehmen sollten, so ergibt sich beispielsweise für den extremen Fall der bis auf 10 Jahre ständig zunehmenden Einsatzverzögerung, daß im Jahre 2000 rund $104 \cdot 10^6$ tSKE Steinkohle und $74 \cdot 10^6$ tSKE Braunkohle gegenüber $33 \cdot 10^6$ tSKE bzw. $23 \cdot 10^6$ tSKE in Kraftwerken eingesetzt werden müßten, wie die Abb. 82 und 83 zeigen.

		Kern- energie	Stein- kohle	Braun- kohle	Primärenergie- verbrauch (10^6 tSKE)
1985	unverzögert	78	33	27	536
	3 Jahre verzögert	59	45	36	538
	5 Jahre verzögert	45	54	43	540
	3 bis 10 Jahre verzögert	38	58	46	541
2000	unverzögert	266	33	23	796
	3 Jahre verzögert	249	45	32	799
	5 Jahre verzögert	236	54	38	801
	3 bis 10 Jahre verzögert	166	104	74	817

TAB. 21: Ergebnisse der Simulationsrechnungen zur Einsatzverzögerung der Kernenergie: zur Stromerzeugung eingesetzte Energieträger und Primärenergieverbrauch, in 10^6 tSKE

Auch der Primärenergieverbrauch würde sich wegen der geringeren Wirkungsgrade der fossilen im Vergleich zu den fortgeschrittenen nuklearen Kraftwerken

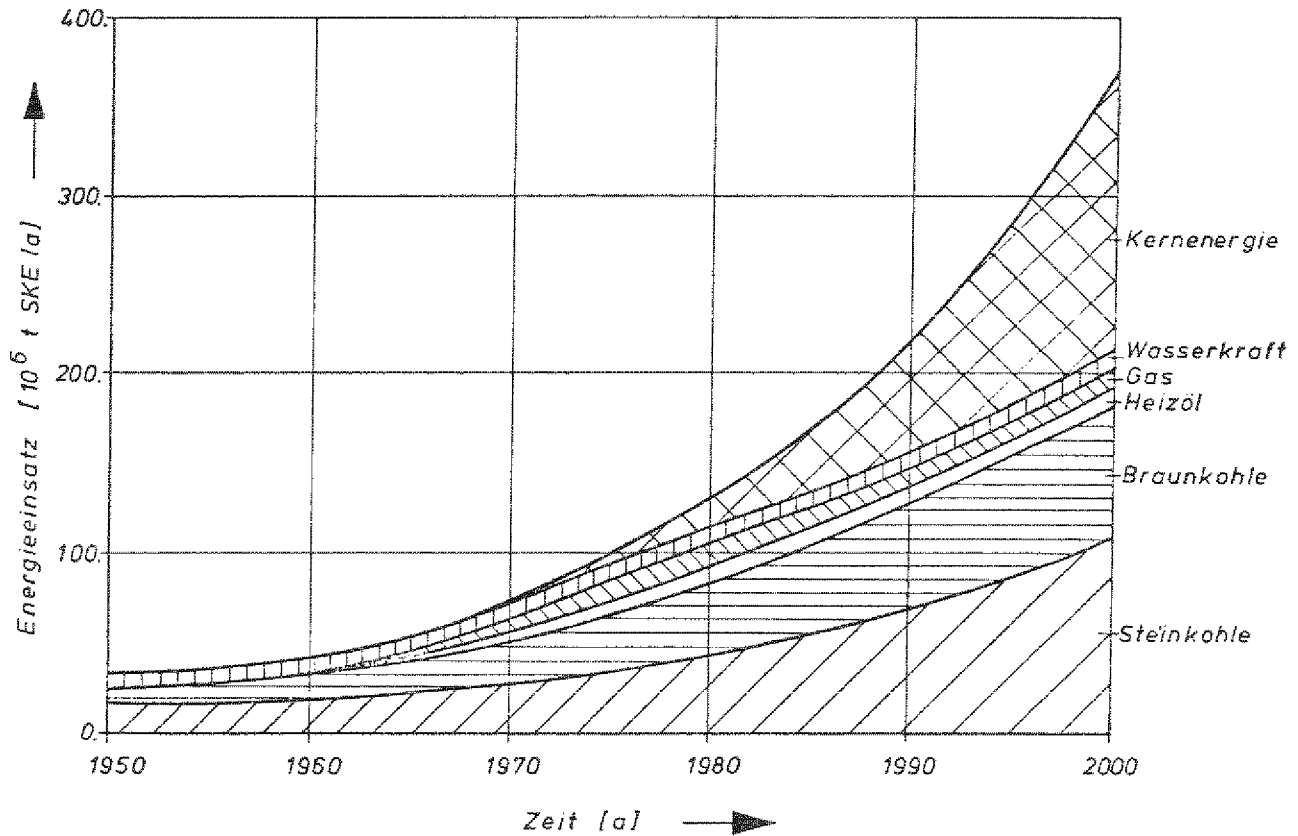


ABB. 82: Energieeinsatz zur Stromerzeugung bei verzögertem Ausbau der Kernkraftwerke

etwas vergrößern. In Tab. 21 werden die Ergebnisse der Strategierechnungen zur Einsatzverzögerung zusammengefaßt.

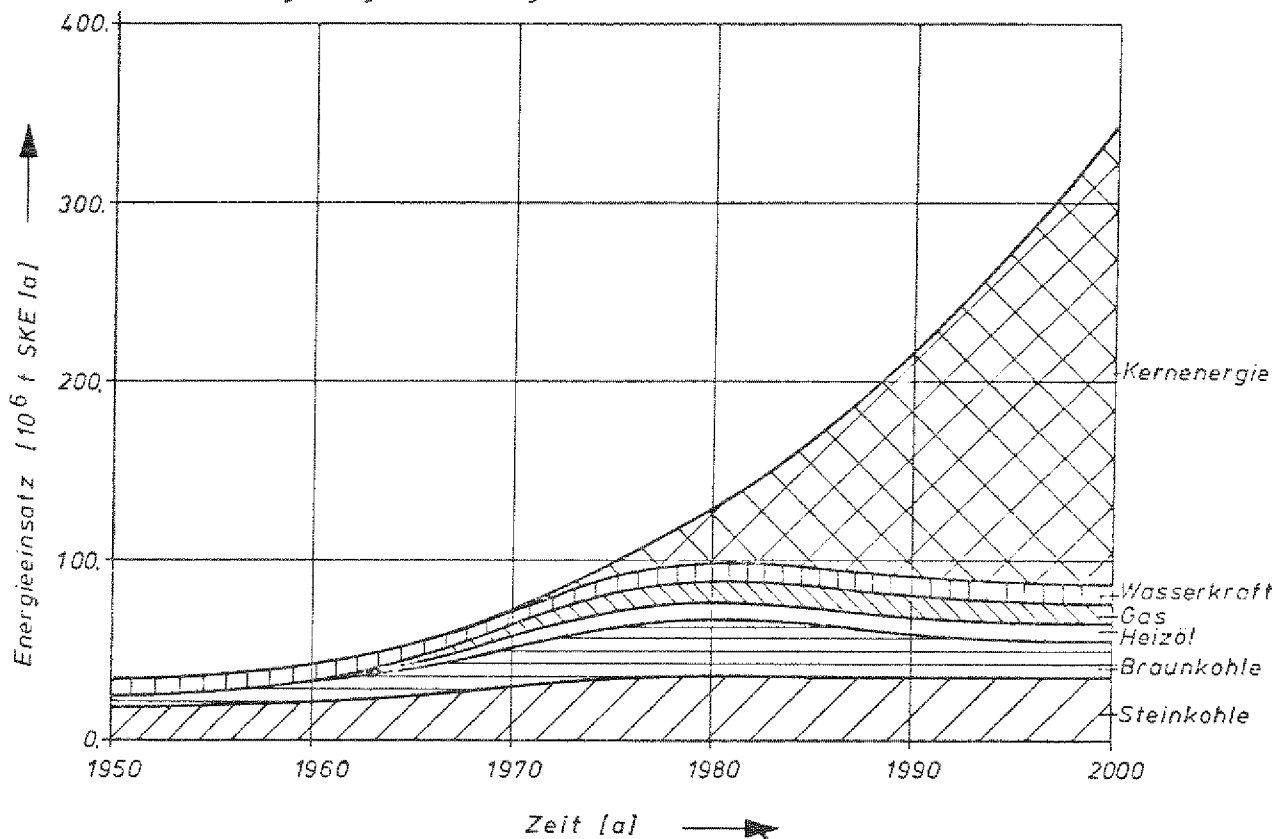


ABB. 83: Energieeinsatz zur Stromerzeugung bei unverzögertem Ausbau der Kernkraftwerke

Vergleicht man die strukturellen Auswirkungen des verzögerten und unverzögerten Kernenergieeinsatzes, so wird deutlich, daß es nahezu unmöglich sein dürfte, den verringerten Kernenergieanteil durch vermehrten Kohleeinsatz zur Verstromung auszugleichen. Denn für die notwendige umfangreiche Ausweitung der Kohleproduktion würden aufgrund der ungünstigen Produktionsbedingungen unverhältnismäßig hohe volkswirtschaftliche Kosten entstehen - abgesehen davon, daß mittelfristig wegen der Knappheit der Facharbeitskräfte im Steinkohlenbergbau wohl kaum die erforderlichen großen Produktionssteigerungen möglich sein dürften. Auf der anderen Seite würde ein stärkerer Kohleeinsatz in Wärmekraftwerken zu größeren emissionsbedingten fossilen Schadstoffbelastungen führen, so daß auch von dieser Seite die Notwendigkeit eines schnellen Kernenergieausbaus erkennbar ist (vgl. Abschnitt 1).

4.3.4.2 Einführung neuer Technologien

Wie in den vorausgegangenen Strategien gezeigt wurde, ist der Einsatz der Kernenergie für die zukünftige Energieversorgung notwendig, um einerseits die Versorgungssicherheit zu erhöhen und andererseits die fossilen emissionsbedingten Umweltbelastungen nicht weiter ansteigen zu lassen. Bisher wurde dabei jedoch lediglich der Einsatz der Kernenergie auf dem Elektrizitätsmarkt betrachtet. Der größte Anteil der an die Endverbraucher abgegebenen Energie wird jedoch für die Erzeugung von Raumheizwärme, Warmwasser und Prozeßwärme verbraucht, nur etwa ein Viertel wird zur Nutzung von Licht und Kraft verwendet, wie Abb. 84 zeigt.

Daher ist es wünschenswert, neue nukleare Technologien zu entwickeln, die auch den großen Bereich der Wärmeenergie abdecken. Eine aussichtsreiche Möglichkeit hierzu bietet die Hochtemperaturtechnologie, wie Abb. 85 zeigt.

An dieser Stelle soll kein Vergleich der Chancen verschiedener Versorgungssysteme und keine Auswahl einzelner Energieträger erfolgen, denn die zukünftige Versorgungsstruktur wird sich wohl weniger ausschließlich auf eine einzige Energietechnologie abstützen, als vielmehr durch eine Mischform der Energiesysteme und -träger gekennzeichnet sein.

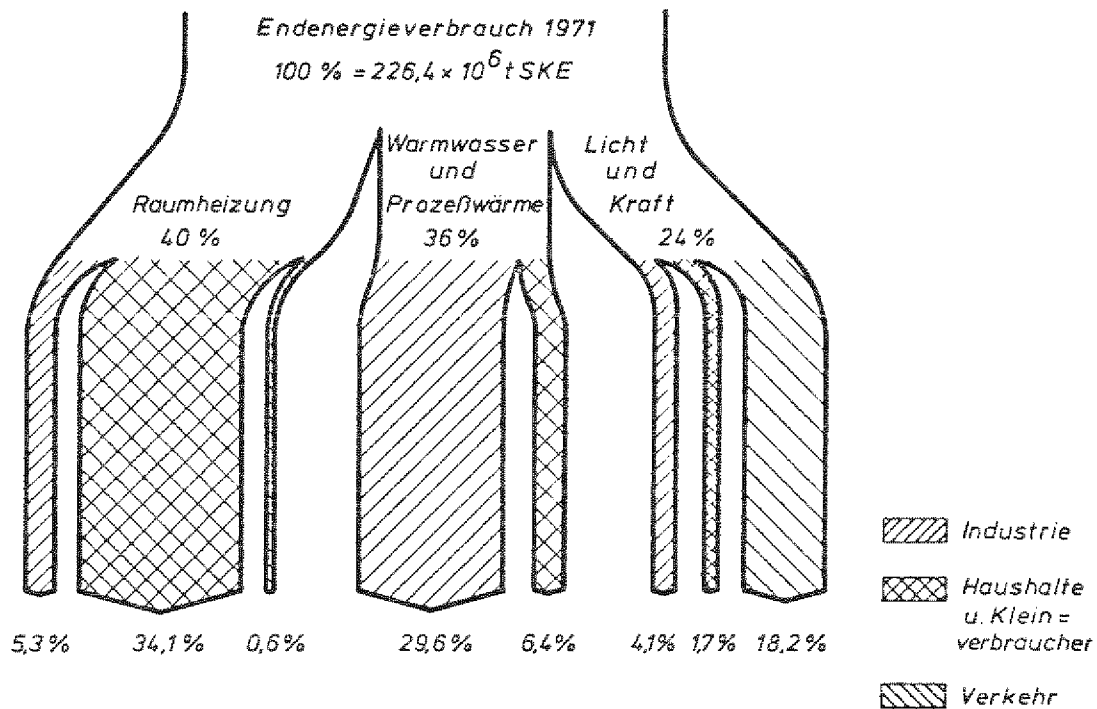


ABB. 84: Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf Nutzungsarten und Verbrauchergruppen im Jahre 1971, nach /133/

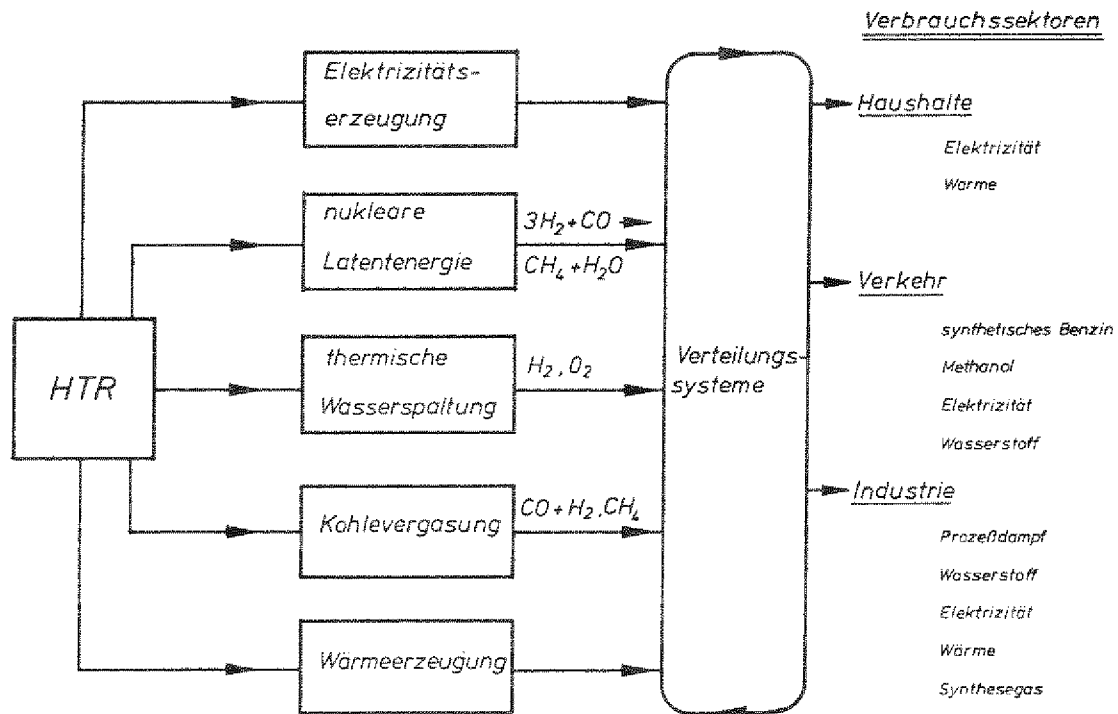


ABB. 85: Einsatzmöglichkeiten des Hochtemperaturreaktors

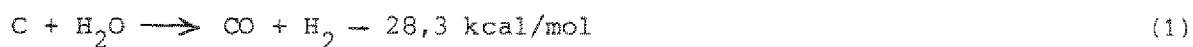
Aus den vielen Möglichkeiten, die die Hochtemperaturreaktortechnologie bietet, werden daher nur drei Verfahren beispielhaft ausgewählt:

- Kohlevergasung mittels nuklearer Prozeßwärme,
- Eisenerzdirektreduktion unter Verwendung von mit nuklearer Prozeßwärme erzeugtem Wasserstoff,
- Einsatz der nuklearen Latent- bzw. Fernenergie für die Wärmebedarfsdeckung in Industrie, Haushalt und Kleinverbrauch.

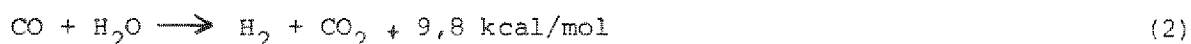
Im folgenden sollen die Auswirkungen des kombinierten Einsatzes dieser Verfahren auf die Versorgungsstruktur untersucht werden. Dazu werden zunächst die Besonderheiten der einzelnen Technologien kurz dargestellt.

Kohlevergasung

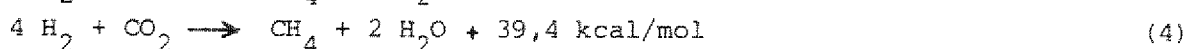
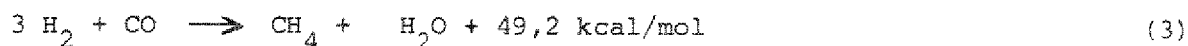
Grundlage der wichtigsten heute vorgeschlagenen Kohlevergasungsverfahren /128/ ist die sogenannte heterogene Wassergasreaktion:



Kohlenstoff wird bei Temperaturen oberhalb 600 °C mit Wasserdampf zu Synthesegas umgesetzt. Bei Einsatz geeigneter Katalysatoren im Temperaturbereich um 400 °C läßt sich das entstandene CO nach der exotherm ablaufenden homogenen Wassergasreaktion in weiteren Wasserstoff und Kohlendioxid umwandeln:



Durch Auswaschen des Kohlendioxids kann auf diese Weise reiner Wasserstoff erzeugt werden. Die katalytische Umsetzung zu Methan läßt sich bei Temperaturen von 400 °C und Drücken von 40 - 70 atm in folgender Weise erreichen:



Ein anderer Weg zur Erzeugung von Methan beruht auf der direkten Umsetzung von Kohlenstoff bei Drücken oberhalb 50 atm und Temperaturen oberhalb 600 °C unmittelbar mit Wasserstoff:



Um einen vollständigen Kohlenstoffumsatz zu erzielen, empfiehlt es sich dabei, die Reaktionen (5), (1) und (2) zu koppeln. Dabei wird der bei der Hydrierung nach der Reaktion (5) zurückbleibende Restkoks zur Wasserstofferzeugung nach Reaktion (1) und (2) ausgenutzt. Mit diesem Wasserstoff wird dann frisch eingesetzte Kohle nach Reaktion (5) zur Erzeugung von Methan und Restkoks verwendet.

Eine weitere Möglichkeit der Kohlevergasung besteht darin, einen autothermen Reaktionsablauf zu erreichen, indem Kohle und Koks unter gleichzeitigem Einsatz von Wasserdampf und Wasserstoff zur Vergasung gebracht wird.

Für die Kohlevergasung existieren - den verschiedenen Reaktionen entsprechend - derzeit eine Reihe von Verfahren mit unterschiedlichem Entwicklungsstand, wie Tab. 11 zeigt. Im Hinblick auf die Einkopplung von nuklearer Wärme zur Vergasung werden dabei folgende zwei Prozesse intensiv verfolgt /128/:

- Wasserdampfvergasung von Kohle in einem Wirbelbettreaktor. Dabei wird das aus dem Kernreaktor austretende heiße Helium so geführt, daß es das Wirbelbett in einem darin eintauchenden Wärmetauscher durchströmt ("Tauchsieder"-Verfahren)
- Hydrierende Vergasung von Kohle. Dabei wird ein Teil der Kohle mit einem Gemisch von Wasserdampf und Wasserstoff vergast. Der benötigte Wasserstoff wird dadurch erzeugt, daß ein Teil des erzeugten Methans in einem Röhrenspaltofen unter Verwendung von Kernreaktorwärme mit Wasserdampf gespalten wird.

Gegenüber den nichtnuklearen Vergasungsverfahren liegen die Vorteile bei der Einkopplung von Kernreaktorwärme in den Vergasungsablauf, vor allem in einem höheren Wirkungsgrad des Gesamtprozesses /128/ und in

der viel besseren Ausnutzung der fossilen Energiereserven begründet, wie Abb. 86 verdeutlicht.

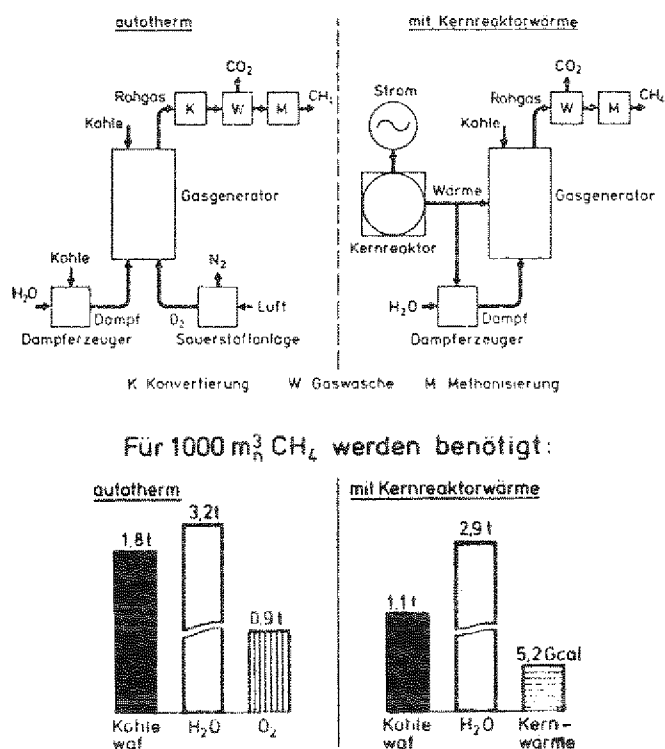


ABB. 86: Vergleich der Einsatzstoffe und Energien bei autothermer und allothermer Vergasung (H_2O -Vergasung und Methanisierung), nach /128/

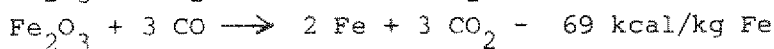
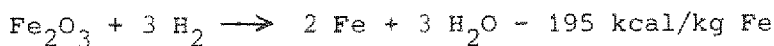
Für die Strategierechnungen wurde von der Anwendung der hydrierenden Vergasung der Braunkohle ausgegangen. Dabei sind die in /129/ angeführten Zahlenwerte der spezifischen Einsatz- und Ausstoßmengen verwendet worden.

Eisenerzdirektreduktion

Für den Einsatz von nuklearer Prozeßwärme zur Eisenerzdirektreduktion bieten sich die Gasreduktionsverfahren an, die als Reduktionsmittel ein Wasserstoff-Kohlenmonoxid-Gemisch verwenden. Die für die Erzeugung

des Reduktionsmittels benötigte Energie, die bisher (bei der Koksmetallurgie) durch fossile Verbrennungsprozesse geliefert wurde, kann so durch die Verwendung von nuklearer Energie substituiert werden. Auf die verschiedenen Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff oder Wasserstoff-Kohlenmonoxid-Gemischen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden (vgl. hierzu die vorhergehenden Ausführungen, sowie z.B. /129, 130, 131/).

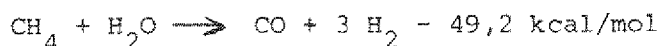
Bei der Reduktion von Eisenerz mit CO und H₂ nach dem Schachtofenprinzip (das sowohl von der spezifischen Erzeugungsleistung als auch vom spezifischen Energieverbrauch her am günstigsten ist /132/) laufen die folgenden chemischen Grundreaktionen ab:



Für die Auslegung einer Schachtofenanlage zur Direktreduktion mit Wasserstoff sind in /132/ Kennzahlen angegeben worden. Diese Verfahrensgrößen liegen auch den folgenden Strategierechnungen zugrunde.

Nukleare Fernenergie

Der bei der hydrierenden Kohlevergasung dargestellte Prozeß der Methan-spaltung



ist reversibel. Bei Anwesenheit geeigneter Katalysatoren verläuft diese Reaktion auch in umgekehrter Richtung. d.h. CO und H₂ werden in Methan und Wasserdampf zurückgebildet, wobei die eingekoppelte Wärme freigesetzt wird.

Wenn die nukleare Wärme durch ein Fernenergiesystem, das über die kalten Gase (CO, H₂) latente chemische Wärme transportiert, übertragen wird, können in großer Entfernung von dichtbesiedelten Gebieten Kernenergie-

anlagen zur Bedarfsdeckung erstellt werden. Dabei wird die bei der Methanspaltung am Standort des Kernreaktors eingekoppelte Wärme durch Rekombination des CO-H_2 -Gemisches beim Verbraucher wieder zurückgewonnen. Da beim heutigen Stand der Technik in der Methanisierung Temperaturen von 450°C erreicht werden (höhere Temperaturen werden angestrebt), könnte mit diesem System der Heizwärmebedarf und ein großer Teil des niedertemperaturigen Prozeßwärmebedarfs der Industrie und Kleinverbraucher abgedeckt werden.

Das entstandene Methan wird über eine Ferngasleitung wieder zum Hochtemperaturreaktor zurückgeführt und in den Methanspaltungsprozeß eingeschleust. Das Fließschema des Kreislaufsystems Methan - Synthesegas wird aus der Abb. 87 ersichtlich.

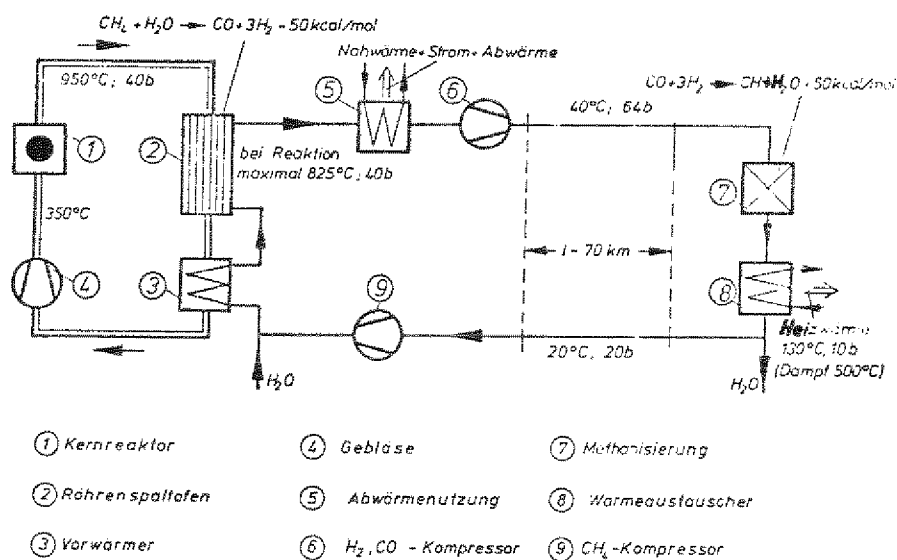


ABB. 87: Fließschema des Kreislaufsystems Methan - Synthesegas, nach /134/

Je nach Schaltung kann ein Anteil von 50 % - 75 % der Reaktorleistung in Fernenergie umgesetzt werden, der Rest wird entweder in Form von Nahwärme (Heißwasser von $145^\circ\text{C}/15\text{b}$) abgegeben und/oder in elektrische Energie umgewandelt. Da das Verfahren, abgesehen von Leckverlusten, keine fossilen Rohstoffe verbraucht, gleichzeitig aber in der Lage ist, weit entfernte Verbraucher zu versorgen und bei einem großen Rohrleitungsnetz große Speicherkapazitäten enthält, ist es vom Standpunkt der Re-

serveschonung und Versorgungssicherheit allen anderen an der Wärmedarbietung beteiligten Versorgungssystemen vorzuziehen. Darüber hinaus kann über dieses System auch die Versorgung der Verbraucher mit Synthesegas sichergestellt werden.

Für das in der vorliegenden Strategierechnung simulierte Fernenergiesystem ist von der Wärmeabgabe an Haushalte, Kleinverbraucher und Industrie im geschlossenen Kreislauf ausgegangen worden, wobei die in /134/ angegebenen Zahlenwerte für die erzeugte Fernenergie, die Nahwärme, die Abwärme und die elektrische Leistung je eingesetzter Reaktorleistung verwendet wurden.

Da es nicht Ziel dieser Arbeit ist, Aussagen über den wahrscheinlichen Zeitpunkt des großtechnischen Einsatzes von Technologien, die sich zum Teil in der Entwicklungs-, Erprobungs- oder Demonstrationsphase befinden, abzuleiten, sondern die grundlegenden Auswirkungen hinsichtlich der Veränderung der Versorgungsstrukturen zu analysieren, wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Ab 1980 werden die neuen Sekundärenergieträger Synthesegas, Wasserstoff und die nukleare Fernenergie eingeführt. Ihr Anteil kann entsprechend dem Ausbau der Versorgungskapazitäten nach und nach so gesteigert werden, daß im Jahre 2000 schließlich

- 30 % des Primärenergieverbrauchs an Gas durch die Braunkohlevergasung mittels nuklearer Wärme,
- 30 % des Energieverbrauchs der Eisenschaffenden Industrie durch Eisenerzdirektreduktion mit Hilfe nuklear erzeugten Wasserstoffs,
- 30 % des Heizwärme- und des Prozeßwärmeverbrauchs bei Industrie und Kleinverbrauchern durch die Wärme aus nuklearer Fernenergie

ersetzt werden können.

Die strukturellen Auswirkungen dieser Strategie auf der End- und Primärenergieseite werden durch die Abbildungen 88 und 89 wiedergegeben.

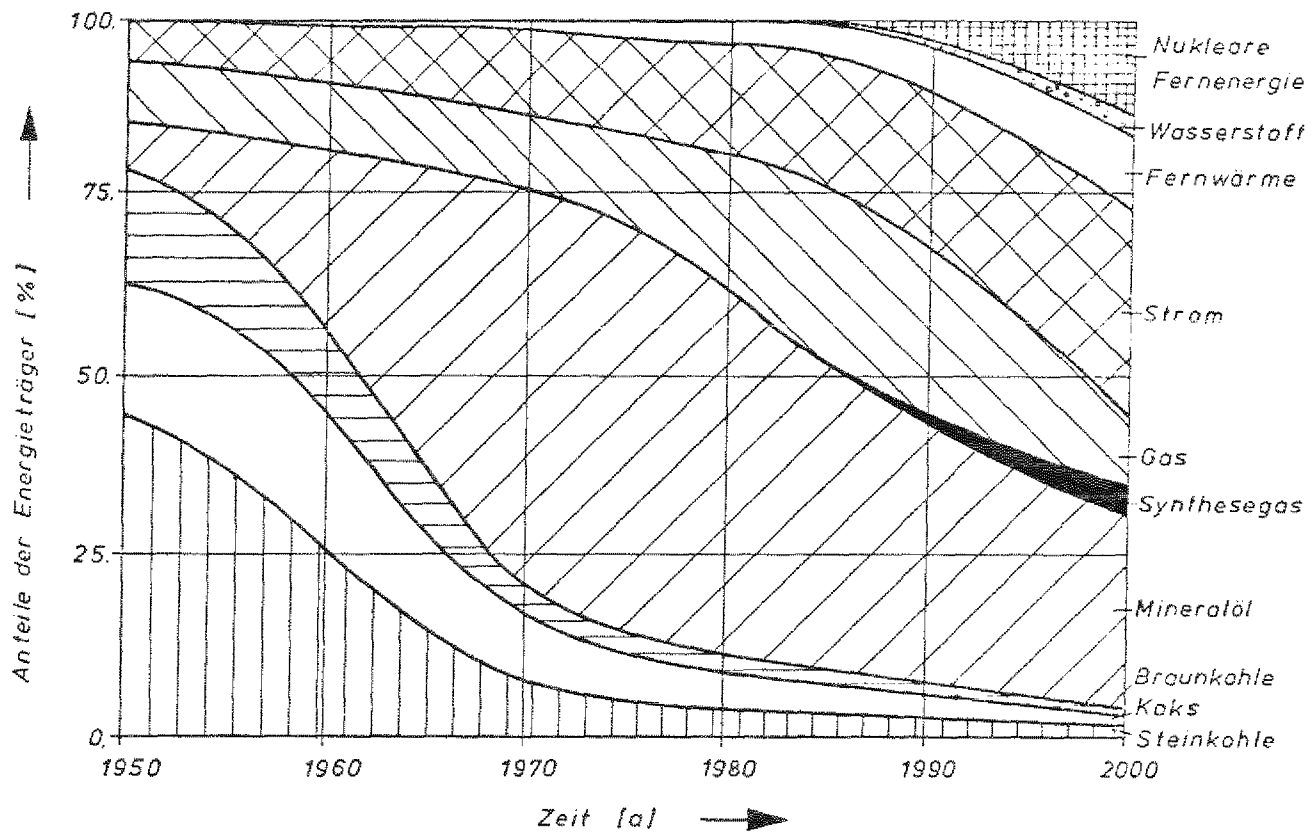


ABB. 88: Struktur des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern bei Einführung neuer Technologien

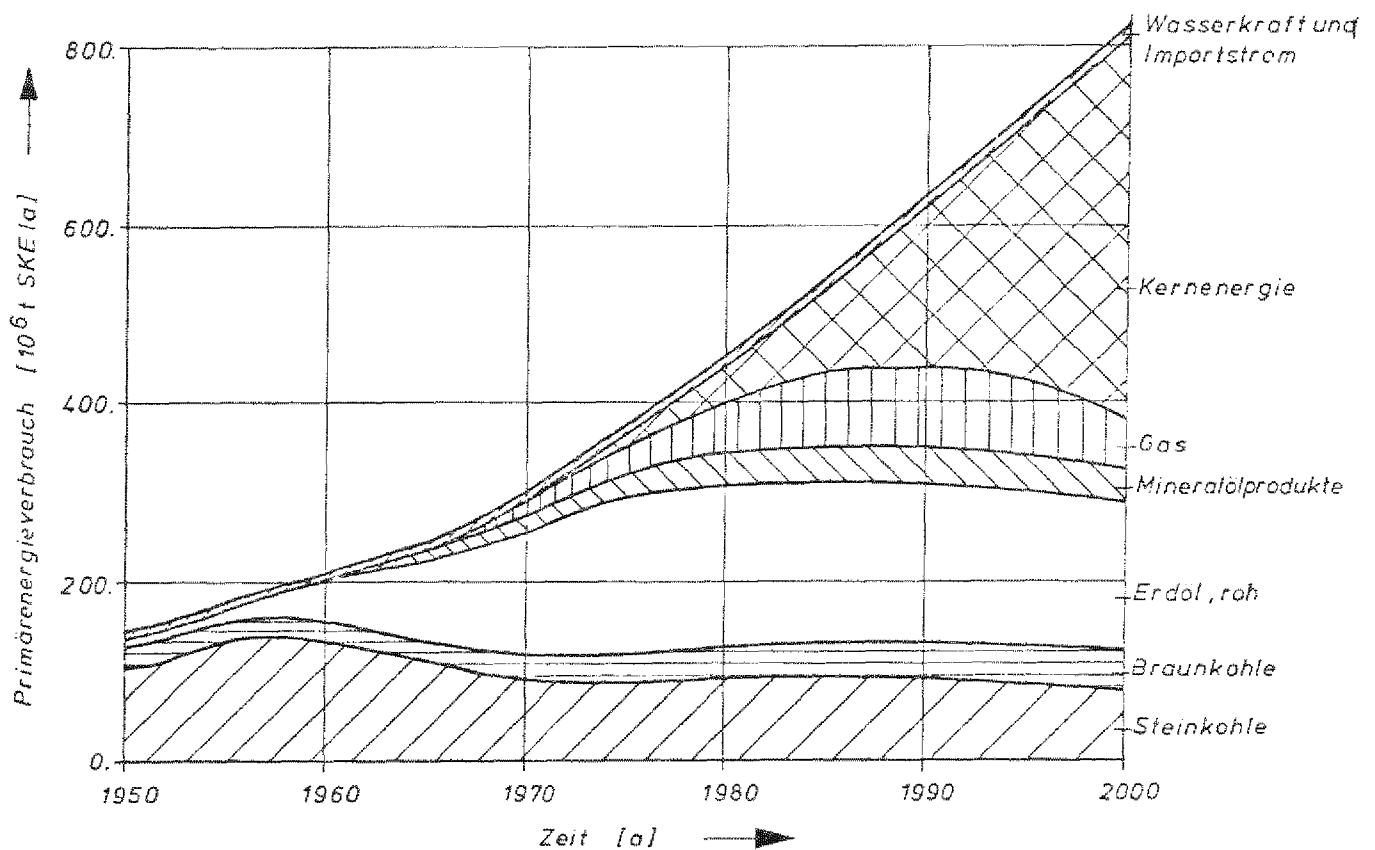


ABB. 89: Primärenergieverbrauch bei Einführung neuer Technologien

Im Vergleich zur Situation ohne Einführung neuer Sekundärenergieträger zeigt sich, daß der Verbrauch an eingeführten fossilen Energieträgern (Erdöl, Mineralölprodukte, Erdgas) von ca. $320 \cdot 10^6$ tSKE auf etwa $260 \cdot 10^6$ tSKE im Jahre 2000 spürbar gesenkt werden könnte. Gleichzeitig würde in beiden Fällen der Bedarf an Stein- und Braunkohle mit insgesamt rund $120 \cdot 10^6$ tSKE im Jahre 2000 etwa unverändert bleiben. Denn die Einsparung an Steinkohle wegen der geringeren Koks Nachfrage in der Eisenschaffenden Industrie würde durch den höheren Einsatzanteil der Braunkohle für die Vergasung (rund $10 \cdot 10^6$ tSKE Vergasungseinsatz im Jahre 2000) in etwa wieder ausgeglichen. Der Anteil der Kernenergie an der Primärenergieversorgung würde sich durch die neuen Technologien von ca. 43 % auf 51 % erhöhen. Auch der gesamte Primärenergieverbrauch würde sich wegen der umwandlungsbedingten Verluste bei Einführung neuer Sekundärenergieträger geringfügig vergrößern. Die Zunahme beträgt etwa 4 %.

Inwieweit es gelingen kann, in einer derart kurzen Frist neue nukleare Versorgungssysteme, die heute entwickelt werden, in den Markt einzuführen und andere Energieträger zu verdrängen, hängt nicht zuletzt davon ab, wie sich das Preisgefüge auf dem internationalen fossilen Brennstoffmarkt entwickelt, und ob die notwendigen großen Investitionen für die Sicherung unserer Energieversorgung erbracht werden können. Vom Standpunkt der Minderung der Importabhängigkeit von fossilen Energieträgern wäre ein schneller Ausbau der kerntechnischen Anlagen anzustreben; wie die vorliegende Strategierechnung zeigt, würde sich damit die Einfuhrabhängigkeit von Mineralöl und Erdgas von ca. 40 % auf 30 % für das Jahr 2000 senken lassen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN MODELLRECHNUNGEN

Im Zusammenhang mit einer Diskussion über die Situation der Energiewirtschaft in der BRD wurden die Problemkomplexe Reserven und Versorgungssicherheit, Investitionen und Finanzierung sowie der Bereich Umwelt besonders erörtert. Dabei wurde deutlich, daß es methodisch neuer Ansätze bedarf, um die Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft im Gesamtzusammenhang darzustellen. Als geeignetes Instrument um entscheidungsbezogene, quantitative Aussagen abzuleiten, erwies sich die Analyse mit Hilfe eines computergestützten Simulationsmodells. Die Konzeption eines Modells für die BRD, das die wesentlichen Beziehungen zwischen Energieverbrauchern, Energieversorgern und den an der volkswirtschaftlichen Leistungserstellung beteiligten Gruppen durch Ursache-Wirkungsströme dynamisch beschreibt, wurde im einzelnen dargelegt.

Die verschiedenen Bedingungen, die den einzelnen Strategierechnungen des Modells zugrunde gelegt wurden, zeigen mehrere alternative Entwicklungsmöglichkeiten in der Energiewirtschaft auf. Im folgenden werden die Ergebnisse und Schlußfolgerungen der verschiedenen modellmäßig dargestellten Perspektiven zusammengefaßt.

- Bei weiter wachsender Wirtschaft, aber verringerter Wachstumsgeschwindigkeit würde der Primärenergieverbrauch bis zum Jahre 2000 auf ca. $800 \cdot 10^6$ tSKE ansteigen, also um durchschnittlich 3 % pro Jahr zunehmen, falls keine besonderen Maßnahmen zur Energieeinsparung ergriffen werden. Voraussetzung für das Wachstum sind dabei eine ungestörte Energieversorgung sowie eine annähernd gleich hohe Export- und Investitionsquote wie in der Vergangenheit.
- Möglichkeiten der Energieeinsparung von etwa 30 % gemessen am derzeitigen Verbrauchsniveau eröffnen sich insbesondere im Raumheizwärmebereich durch Einführung geeigneter Maßnahmen zur Wärmedämmung und Raumtemperaturregelung. Diese Einsparungen würden vor allem eine Verringerung der Nachfrage nach Mineralöl bewirken, können jedoch nicht generell zur Lösung der Energieprobleme führen.

- Die Abhängigkeit von fossilen Energieimporten würde im Falle einer Versorgungskrise zu großen volkswirtschaftlichen Verlusten führen. Bei einer 33 %-igen Lieferkürzung von Mineralöl würden die direkten durch Produktionseinschränkungen in der Gesamtwirtschaft verursachten Ausfälle kostenmäßig der innerhalb eines Jahres insgesamt erbrachten volkswirtschaftlichen Leistung entsprechen. Die Erholungszeiten nach einer derartigen krisenbedingten Rezession würden selbst bei äußerst schnell ablaufenden Substitutionsvorgängen mehr als fünf Jahre erfordern.
- Eine totale Beseitigung der Einfuhrabhängigkeit von Energie scheint nicht erreichbar zu sein, da die im Inland gewinnbaren flüssigen und gasförmigen Energieträger bald erschöpft sein werden, während Stein- und Braunkohle aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen nur begrenzt Produktionssteigerungen zulassen, die Deckung des Energieverbrauchs also nur zu einem Teil übernehmen können. Trotz der Notwendigkeit, weiterhin Energie zu importieren, kann die Versorgungssicherheit jedoch durch einen beschleunigten Strukturwandel im Sinne einer starken Verlagerung zur Kernenergie vergrößert werden.
- Um eine schnelle Änderung der Versorgungsstruktur zu erzielen, ist es notwendig, daß die bisherigen Ausbauprogramme für Kernenergieanlagen unverzüglich realisiert werden können. Dazu ist eine Vereinheitlichung und Verkürzung der Genehmigungsverfahren und eine Standardisierung der Anlagentypen anzustreben, wobei jedoch die Aspekte der Anlagensicherheit und des Umweltschutzes nicht vernachlässigt werden dürfen.
- Für eine weitere Stabilisierung der Energieversorgung ist der Einsatz der heimischen Kohlenenergie in einer Kombination mit nuklearer Prozeßwärme aus Hochtemperaturreaktoren zweckmäßig. Mit einem Versorgungssystem, das die inländische Kohle durch die Einkopplung hochtemperaturiger nuklearer Wärme reserveschonend ausnutzt, würde sich ein großer Teil des Heizwärme- und Prozeßwärmebedarfs in allen Verbrauchssektoren abdecken lassen. Durch Einführung der nuklearen Kohlevergasung, der Eisen-erzdirektreduktion mittels nuklearer Prozeßwärme und der nuklearen Fernenergie mit einem Marktanteil von 30 % in den entsprechenden Verbrauchsbereichen würde sich beispielsweise die Abhängigkeit von fossilen Energieimporten von 40 % auf 30 % verringern lassen.

Aus diesen mit Hilfe von Strategierechnungen modellmäßig ermittelten Ergebnissen und Schlußfolgerungen kann die grundsätzliche Aussage abgeleitet werden, daß der Herausforderung, die durch die veränderte Energiesituation entstanden ist, durch eine hochentwickelte Energietechnologie begegnet werden kann und daß die künftigen Energieprobleme im Sinne der energiepolitischen Zielvorstellungen generell gelöst werden können. Dies ist allerdings nur dann zu erreichen, wenn es in nächster Zeit gelingt, durch eine effektive Forschung und Entwicklung in allen Bereichen der Energietechnik und durch eine entsprechend große Investitionsbereitschaft der Energiewirtschaft alternative Energieversorgungsmuster auf der Basis Kernenergie/Kohle anzubieten. Durch diese Kombination kann sichergestellt werden, daß der überwiegende Teil der für die Bereitstellung von Wärme, Kraft und Licht erforderlichen Energien zu vertretbaren volkswirtschaftlichen Gesamtkosten gedeckt wird. Die heimische Kohle würde reserveschonend genutzt und durch die eingekoppelte nukleare Wärme umweltfreundlich veredelt. Die Kernenergie selbst ist wegen der hohen Energiedichte und den damit verbundenen günstigen Lagerungs- und Transportmöglichkeiten sowie wegen der globalen Verteilung der Reserven über politisch stabile Regionen vom Standpunkt der Versorgungssicherheit anderen importierten Energieträgern vorzuziehen. Je größer die Beteiligung der Kernenergie und der heimischen Energieträger an der Energiebedarfsdeckung wird, desto größer sind daher die Chancen, daß der verstärkte Wettbewerb auf dem Energiemarkt Angebots- und preisregulierend wirkt und somit zu einer Stabilisierung der energiewirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Entwicklung beiträgt.

LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ KRUSE, J.:
Energiewirtschaft, Struktur und Wachstum.
Heft 16, Duncker & Humblot, Berlin und München, 1972.
- /2/ FIRNHABER, R.B.:
Ist unsere Energieversorgung in Zukunft gesichert?
BWK, 23, Nr. 5, 1971, S. 223 f.
- /3/ Der Bundesminister für Wirtschaft:
Das Energieprogramm der Bundesregierung.
Bonn, September 1973.
- /4/ RETTINGER, H.:
Die Mineralölkrise und ihre möglichen Folgen.
Öl, Zeitschrift für die Mineralölwirtschaft, Heft 3, 1974, S. 72 f.
- /5/ KRÜGER, K.:
Machtfaktoren der Weltwirtschaft.
Safari-Verlag, Berlin, 1971.
- /6/ Statistisches Bundesamt Wiesbaden:
Systematik der Wirtschaftszweige.
Kohlhammer-Verlag, Mainz und Stuttgart, 1961.
- /7/ Arbeitskreis Energiebilanzen:
Energiebilanzen der BRD, 1950 - 1972.
Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke, Frankfurt/M.
- /8/ Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft:
Tätigkeitsberichte.
Essen, 1969/70, 1970/71, 1971/72, 1972/73, 1973/74.
- /9/ LANTZKE, U.:
Wirtschaftspolitische Voraussetzungen einer bedarfsgerechten Energieversorgung in der BRD.
Tagungsberichte des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln, Heft 17, Verlag R. Oldenbourg, München, 1974, S. 165 f.
- /10/ NÖLKEN, G.:
Untersuchung des Wachstums und der Preisentwicklung in der Energiewirtschaft und anderen ausgewählten Wirtschaftsbereichen der BRD seit 1950.
Aachen, Lehrstuhl für Reaktortechnik der RWTH, Diplomarbeit, 1974.
- /11/ WESSELS, Th.:
Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Energiekosten.
Verlag R. Oldenbourg, München, 1966.
- /12/ RUMLER, F.J.:
Wirtschaftliche Probleme bei der Aufstellung von Energiebilanzen und bei der Vorausschätzung des künftigen Energiebedarfs.
Verlag R. Oldenbourg, München, 1960.

- /13/ SCHREIBER, B.:
Der spezifische Energieverbrauch der Industrie.
Schriftenreihe des IFO-Instituts für Wirtschaftsforschung, Nr. 57, Berlin, 1964.
- /14/ Arbeitsgemeinschaft wirtschaftswissenschaftlicher Forschungsinstitute
in der BRD.
Untersuchung über die Entwicklung der gegenwärtigen und zukünftigen Struktur von Angebot und Nachfrage in der Energiewirtschaft der BRD unter besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus (Energieenquete).
Duncker & Humblot, Berlin und München, 1961.
- /15/ FORRESTER, J.W.:
World Dynamics.
Wright-Allen-Press, Cambridge, Massachusetts, 1971.
- /16/ MEADOWS, D. et al.:
The Limits to Growth.
Universe Books, New York, 1972.
- /17/ VOSS, A.:
Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch - Energie - Umwelt.
KFA Jülich, JÜL-982-RG, Juli 1973.
- /18/ HAMMOND, A.L.:
Energie für die Zukunft, Wege aus dem Engpaß.
Umschau-Verlag, Frankfurt 1974.
- /19/ BUCH, A.:
Planung und Standortwahl von Kraftwerken.
Krauskopf-Verlag, Mainz, 1973.
- /20/ BP Benzin und Petroleum AG:
Zahlen aus der Mineralölwirtschaft.
Hamburg, Sommer 1974.
- /21/ ESSO-AG:
Esso-Studie 7, Hamburg, 1972.
- /22/ HUBBERT, M.K.:
Energy Resources for Power Production.
IAEA-SM-146/1, 1970.
- /23/ CAMERON, J.:
Uranium Resources and Supply.
IAEA-Bulletin, 1973.
- /24/ FÖRSTER, K.:
Allgemeine Energiewirtschaft.
Duncker & Humblot, Berlin, 1965.
- /25/ OECD/IAEA:
Uranium, Resources Production and Demand.
Joint Report, Paris, August 1973.

- /38/ Statistisches Bundesamt, Wiesbaden:
Statistisches Jahrbuch 1973, Kohlhammer-Verlag, Mainz, 1974.
- /39/ WHITE, D.E.:
Geothermal Energy.
U.S. Geological Survey Circular, 519, Washington, 1965.
- /40/ MELISS, M.:
Mündliche Mitteilungen.
KFA Jülich, 1974.
- /41/ ZENER, D.:
Solar Sea Power.
Physics Today, Jan. 1973, p. 48-53.
- /42/ BADER, W.:
Krisensichere Wasserkraftwerke.
VDI-Nachrichten Nr. 9/1.
VDI-Verlag, Düsseldorf, März 1974, S. 6.
- /43/ VOSS, A.:
Ungenützte umweltfreundliche Energiequellen?
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 1973 (1974, Heft 2), S. 19-27.
- /44/ KOLLBRUNNER, C., und STAUBER, H.:
Gletscherkraftwerke in Grönland.
Zürich, 1972.
- /45/ Bergbauforschung GmbH, Rheinische Braunkohlenwerke AG, Kernforschungs-
anlage Jülich GmbH:
Entwicklung von Verfahren zur Umwandlung fossiler Rohstoffe mit Wärme
aus Hochtemperaturreaktoren. Sicherung der Energie- und Rohstoffversor-
gung durch nukleare Prozesswärme.
Essen, Köln, Jülich, Dezember 1973.
- /46/ RAMMER, P.:
Finanzierungsspielraum wird zu eng. Zeitung für kommunale Wirtschaft.
November 1974, S. 7.
- /47/ Dresdner Bank AG:
Energiewirtschaftliche Entwicklung in der BRD bis 1980/85. Deckung des
künftigen Kapitalbedarfs.
Februar 1974.
- /48/ Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.:
Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik im Jah-
re 1973.
Essen, Oktober 1974.
- /49/ SCHNEIDER, H.K., SCHÜRMANN, H.J., KÖNIG, W.:
Die Anforderungen der sozialen und natürlichen Umwelt an die Planung
und Entwicklung der Elektrizitätswirtschaft in der BRD.
BWK 26 (1974), Nr. 9, S. 374-379.

- /50/ Geschäftsbericht der Deutschen Bundesbank für das Jahr 1973.
Frankfurt, 1974, S. 26.
- /51/ SCHIKARSKI, W.:
Die voraussichtlichen Auswirkungen des Energieverbrauchs in der BRD auf
die Umwelt.
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 73 (1974), Heft 19, S. 535-540.
- /52/ FAUDE, D. et al.:
Energie und Umwelt in Baden-Württemberg.
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Angewandte Systemforschung
und Reaktorphysik, KFK 1966 UF, April 1974.
- /53/ BONKA, H.:
Radioaktive Umweltbelastung durch Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitungs-
anlagen im Normalbetrieb.
KFA Jülich, Interner Bericht, KFA-IRE-IB-7/74, Januar 1974.
- /54/ NIEHAUS, F.:
Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energieerzeugung: CO und H³.
Diss. in Vorbereitung, RWTH Aachen, 1975.
- /55/ MEYER-ABICH, K.:
Die ökologische Grenze des Wirtschaftswachstums.
Umschau 72 (1972), Heft 20, S. 645-649.
- /56/ BECK, P., GOETTLING, D.:
Energie und Abwärme.
Beiträge zur Umweltgestaltung, Heft B 8, Erich Schmitt Verlag, Berlin 1973.
- /57/ MORDY, W.A.:
Bedroht Energieerzeugung das Klima?
in: Probleme im Gespräch, Band 7, Energie, Mensch und Umwelt, Verlag
Herbert Lang, Bern und Frankfurt a.M., S. 103-112.
- /58/ GRÜMM, H.:
Energieerzeugung und Umwelt.
Atomwirtschaft, Nr. 6, Juni 1971, S. 278-288.
- /59/ WESSELS, Th.:
Die Investitionen in der Energiewirtschaft im Rahmen der volkswirtschaft-
lichen Entwicklung.
in: Investitions- und Finanzierungsprobleme der Energiewirtschaft, Ver-
lag R. Oldenbourg, München, 1966, S. 13-31.
- /60/ BLÖMER, K.H.:
Energieprognosen im Lichte der Erfahrung.
in: Ordnungsprobleme und Entwicklungstendenzen in der deutschen Energie-
wirtschaft (Festschrift für Theodor Wessels), Vulkan-Verlag, Essen 1967,
S. 125-140.
- /61/ BRENDOW, K.:
Ökonometrische Modelle der gesamten Energiewirtschaft.
Glückauf 108 (1972), Nr. 16, S. 691-702.

- /62/ JUNGK, R.:
Diskussionsbeitrag zu:
Shivaji Lal: Energieplanung und Ideologie, in: Probleme im Gespräch,
Band 7, Energie, Mensch und Umwelt, Verlag Herbert Lang, Bern und Frank-
furt a.M., S. 21-32.
- /63/ Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen:
Umweltgutachten 1974.
Kohlhammer-Verlag, Stuttgart und Mainz, März 1974.
- /64/ HÄFELE, W.:
Energy Systems.
in: Proceedings of IIASA Planning Conference on Energy Systems, Laxen-
burg, Österreich, 1973, S. 9-78.
- /65/ WHITE, D. et al.:
Energy Dynamics, A Tool for Planning and Management.
Second Draft, December 1970.
- /66/ HAMILTON, H.R. et al.:
Systems Simulation for Regional Analysis.
An Application to River-Basin Planning.
The MIT-Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- /67/ THOMAS, J.:
The Energy Equations, Models as an aid to Policy Making.
New Scientist, February 1974, S. 340-342.
- /68/ SCHULTEN, R.:
Vortrag am 15.11.1974 im Rahmen des KFA-Kolloquiums, KFA Jülich, über:
Nukleare Wärme und ihre Anwendung auf dem Energiemarkt (unveröffentlicht).
- /69/ HAUSKE, G.:
Wachstum und Konjunkturschwankungen im kybernetischen Funktionsmodell,
in: Kybernetik und Bionik, Berichtswerk über den 5. Kongreß der Deutschen
Gesellschaft für Kybernetik, R. Oldenbourg Verlag, München 1974, S. 144-
151.
- /70/ KÖNIG, H., TIMMERMANN, V.:
Ein ökonometrisches Modell für die BRD 1950 - 1960 in:
Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft 1962, S. 598.
- /71/ KLEIN, L.R., GOLDBERGER, A.S.:
An Econometric Model of the United States, 1929 - 1952.
Amsterdam 1955, Zitiert nach /76/.
- /72/ TINBERGEN, J.:
An Econometric Approach to Business Cycle Problems.
Paris 1937, zitiert nach /76/.
- /73/ GEHRIG, G.:
Ein markoökonomisches Modell für die BRD.
Schriften des IFO-Instituts, Nr. 56, Berlin und München, 1963.

- /74/ KRELLE, W. u.a.:
Ein Prognosesystem für die wirtschaftliche Entwicklung der BRD.
Verlag Anton Hain, Meisenheim am Glan, 1969.
- /75/ VOGT, W.:
Makroökonomische Bestimmungsgründe des wirtschaftlichen Wachstums der
BRD von 1950 bis 1960.
J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen, 1964.
- /76/ GÖRZIG, B.:
Die Entwicklung des Wachstumspotentials in den Wirtschaftsbereichen
der BRD. Analyse und Projektion bis 1980.
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Beiträge zur Strukturfor-
schung, Heft 18, Duncker & Humblot, Berlin, 1972.
- /77/ COBB, C.W., DOUGLAS, P.H.:
A theory of production.
in: American Economic Review, Suppl.-Vol. XVIII (1928), S. 139-155.
- /78/ SOLOW, R.M.:
Technical Change and the Aggregate Production Function.
in: The Review of Economics and Statistics. Vol. 39, 1957, S. 312 f.
- /79/ GEHRIG, G., KÜHLER, K.C.:
Ökonometrische Analyse des Produktionsprozesses.
in: IFO-Studien, 7. Jg., 1961, S. 175-237.
- /80/ Der Bundesminister für Forschung und Technologie:
Neuen Kraftstoffen auf der Spur. Alternative Kraftstoffe für Fahrzeuge.
Gersbach & Sohn Verlag, München 1974.
- /81/ GRUMBACH, F., GREVE, G.:
Wandlungen in der Beschäftigtenstruktur.
in: KÖNIG, H.: Wandlungen der Wirtschaftsstruktur in der BRD, Schrif-
tenreihe des Vereins für Sozialpolitik, N.F. Band 26, 1962, S. 23 f.
- /82/ BAUMGART, E.R.:
Produktionsvolumen und -potential, Produktionsfaktoren der Industrie
im Gebiet der BRD.
DIW, Vierteljahresheft 1-1973, Duncker & Humblot, Berlin 1973, S.57-73.
- /83/ BUNDESRAT:
Jahresgutachten 1972 des Sachverständigenrates zur Begutachtung der ge-
samtwirtschaftlichen Entwicklung.
Drucksache 612/72, Bonn 1972, S. 190 f.
- /84/ MERTENS, D.:
Die Wandlungen der industriellen Branchenstruktur in der BRD 1950 - 1960.
DIW, SH. 68, Duncker & Humblot, Berlin 1964.
- /85/ SCHWANSE, P.:
Beschäftigungsstruktur und Wirtschaftswachstum in der BRD 1950 bis 1963.
DIW, SH. 74, Duncker & Humblot, Berlin 1965.
- /86/ HOFFMANN, W.G.:
Das Wachstum der deutschen Wirtschaft seit der Mitte des 19. Jahrhunderts.
Springer-Verlag, Berlin 1965.

- /87/ JESCHEK, W.:
Projektion der Qualifikationsstruktur des Arbeitskräftebedarfs in den Wirtschaftsbereichen der BRD bis 1985.
DIW, H. 28, Duncker & Humblot, Berlin 1973.
- /88/ KIRNER, W.:
Zeitreihen für das Anlagevermögen der Wirtschaftsbereiche in der BRD.
DIW, H. 5, Duncker & Humblot, Berlin 1968.
- /89/ BAUMGART, E.R., KRENGEL, J.:
Die industrielle Vermögensrechnung des DIW.
DIW, H. 10, Duncker & Humblot, Berlin 1970.
- /90/ GERFIN, H. et al.:
Entwürfe für disaggregierte Modelle zur Arbeitsmarktprognose für die BRD.
DIW, SH. 90, Duncker & Humblot, Berlin 1972.
- /91/ TIETZ, R.:
Ein anspruchsanpassungsorientiertes Wachstums- und Konjunkturmodell.
Dissertation, Frankfurt/M., 1973.
- /92/ NIEMEYER, G.:
Systemsimulation.
Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt/M., 1973.
- /93/ GORDON, G.:
Systemsimulation.
R. Oldenbourg Verlag, München/Wien, 1972.
- /94/ NIEHAUS, F., RATH-NAGEL, St., VOSS, A.:
Einführung in die systemtechnische Simulationemethode SYSTEM DYNAMICS.
KFA-IRE, JÜL-849-RG, 1972.
- /95/ FORRESTER, J.W.:
Principles of Systems.
Wright Allen Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- /96/ FORRESTER, J.W.:
Industrial Dynamics.
MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1961.
- /97/ PUGH, A.L.:
Dynamo II, User's Manual.
Cambridge, Massachusetts, 1970.
- /98/ FORRESTER, J.W.:
Urban Dynamics.
MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- /99/ RANDERS, J. et al.:
System Simulation to Test Environmental Policy. A Sample Study of DDT-Movement in the Environment.
(Arbeitspapier) System Dynamics Group, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1971.

- /100/ ZAHN, E.:
Das Wachstum industrieller Unternehmen.
Verlag Th. Gabler, Wiesbaden, 1971.
- /101/ SCHAEFER, H.:
Energieversorgung der Zukunft, rationell oder rationiert.
Brennstoff - Wärme - Kraft, 25 (1973), Nr. 7, S. 291-295.
- /102/ STÄGLIN, R., WESSELS, H.:
Input-Output-Rechnung für die BRD 1954, 1958, 1962, 1966.
DIW-Beiträge zur Strukturforchung, H. 27, Duncker & Humblot, Berlin 1973.
- /103/ STÄGLIN, R., WESSELS, H.:
Input-Output-Analysen für die BRD.
DIW-Beiträge zur Strukturforchung, H. 6, Duncker & Humblot, Berlin 1969.
- /104/ MERTENS, D., KIRNER, W.:
Input-Output-Rechnung: Investitionsverflechtung in der BRD 1950 - 1970.
DIW-Beiträge zur Strukturforchung, H. 1, Duncker & Humblot, Berlin 1967.
- /105/ Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl:
Der Energieverbrauch der Haushalte in der BRD. Entwicklung in der Vergangenheit und Vorausschau bis 1975.
Hohe Behörde des EGKS, Luxemburg, 1967.
- /106/ Presse- und Informationsamt der Bundesregierung:
Gesellschaftliche Daten 1973, BRD.
Bonn, 1974.
- /107/ BURCHARD, H.J., STREICHER, H.:
Analyse der Struktur und der Entwicklung des Energieverbrauchs im Sektor Haushalte in der BRD.
Brennstoff - Wärme - Kraft, 23 (1971), Nr. 6, S. 274-277.
- /108/ WESTERHOFF, H.D.:
Die Heizstruktur des Wohnungsbestandes der BRD bis 1985. - Ein Modell zur Vorausschätzung.
Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen, Mitteilungen 3, 23. Jg., S. 197-219, Duncker & Humblot, Berlin, 1972.
- /109/ RUDOLPH, M.:
Vergleich verschiedener Raumheizungssysteme bezüglich Primärenergieaufwand und Schadstoffemissionen im Jahre 1980.
Brennstoff - Wärme - Kraft, 25 (1973), Nr. 3, S. 105-111.
- /110/ WILLIAMS, J.R.:
Solar Energy, Technology and Applications.
Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, 1974.
- /111/ Deutsche Shell AG:
Prognose des PKW-Bestandes. Die Motorisierung im Spannungsfeld von Eigendynamik und Bremsfaktoren.
Aktuelle Wirtschaftsanalysen 6, Hamburg, 1973.

- /112/ BARTHOLMAI, B.:
Analyse des Angebotspotentials und Projektion des Investitionsbedarfs
im Verkehr der BRD.
DIW-Beiträge zur Strukturforschung, H. 20, Duncker & Humblot, Berlin 1972.
- /113/ Der Bundesminister für Verkehr:
Verkehr in Zahlen.
Bonn, 1973.
- /114/ Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen:
Auto und Umwelt.
Gutachten vom September 1973.
Kohlhammer-Verlag, Stuttgart und Mainz, 1973.
- /115/ Zentralstelle für Betriebswirtschaft und Datenverarbeitung der Deutschen
Bundesbahn:
Statistische Unterlagen über den Energieverbrauch und die Verkehrslei-
stung im Reise- und Güterzugsverkehr.
Frankfurt/M., 1974 (persönliche Mitteilung).
- /116/ GRUNEWALD, A.:
Kann der Verkehr umweltfreundlicher werden? Beiträge zur Umweltgestal-
tung.
Heft A 18, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, 1973.
- /117/ MUCKELBERG, E.:
Zukunft des Verkehrs.
Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt/M., 1974.
- /118/ RIEKE, H.:
Die künftige Entwicklung des Straßenverkehrs in der BRD. Fahrleistun-
gen, Kraftstoffverbrauch und Mineralölsteueraufkommen.
DIW-Beiträge zur Strukturforschung, H. 22, Duncker & Humblot, Berlin 1972.
- /119/ SCHAEFER, H.:
Analyse des Kraftbedarfs und seiner Nutzungsgrade in der BRD.
Brennstoff - Wärme - Kraft 23 (1971), Nr. 5, S. 241-246.
- /120/ GÖTTLER, L.L., SCHAEFER, H.:
Prognose des Haushaltstromverbrauchs in der BRD.
Praktische Energiekunde, 14. Jg. (1966), Heft 6, Januar 1967, Karlsruhe/
München, S. 105 f.
- /121/ BEHRNDT, E.:
Der Strombedarf der Haushalte in der BRD bis 1980.
Brennstoff - Wärme - Kraft 23 (1971), Nr. 5, S. 253 f.
- /122/ Der Bundesminister für Wirtschaft:
Daten zur Entwicklung der Energiewirtschaft in der BRD.
III D 3, Bonn, Ausgabe 1973.

- /123/ DOLINSKI, U., WESTMEIER, C.A.:
Projektion des Energieverbrauchs der Industrie und der Haushalte in den Bundesländern bis 1980.
Brennstoff - Wärme - Kraft 22 (1970), Nr. 1, S. 1-7.
- /124/ LIEBRUCKS, M., KUMMER, H.:
Eine langfristige Projektion des Energieverbrauchs in der BRD.
DIW, Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung.
H. 3, 1970, Duncker & Humblot, Berlin, 1970.
- /125/ DERICHs, H.:
Die Problematik der Produktivitätsmessung von Wirtschaftssektoren.
Verlag R. Oldenbourg, München, 1969.
- /126/ Atomwirtschaft - Atomtechnik:
Verlag Handelsblatt, Düsseldorf, Nr. 12, 1974, S. 576.
- /127/ Deutscher Bundestag, 7. Wahlperiode:
Jahresgutachten 1974 des Sachverständigenrates zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung.
Drucksache 7/2848, Verlag Dr. Hans Heger, Bonn, November 1974.
- /128/ JÜNTGEN, H.:
Herstellung gasförmiger Energieträger aus fossilen Brennstoffen.
in: Nichtkonventionelle Energiesysteme.
VDI-Verlag, Düsseldorf, VDI-Berichte 224, S. 13-23, 1974.
- /129/ THISSEN, H.G.:
Wasserstoff - Rohstoff und Energieträger.
KFA Jülich, STE, JÜL-1093-SE, 1974.
- /130/ EICKHOFF, H.-G.:
Technologische und wirtschaftliche Möglichkeiten, die sich durch den Einsatz des Hochtemperaturreaktors für die künftige Mineralölversorgung der BRD ergeben.
KFA Jülich, IRE, JÜL-1017-RG, 1973.
- /131/ EICKHOFF, H.-G., KUGELER, K.:
Nukleare Prozeßwärme für die Wasserstofferzeugung, Einsatz von Hydrocrackanlagen, Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie vereinigt mit Brennstoffchemie.
Bd. 27, H. 9, September 1974.
- /132/ MANTHEY, Chr.:
Einsatz von Hochtemperaturreaktoren in der Eisen- und Stahlindustrie unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses auf die Standort- und Umweltprobleme dieses Industriezweiges.
Diss. RWTH Aachen in Vorbereitung, 1975.
- /133/ SCHAEFER, H.:
Fakten zur Energiebedarfsdeckung.
Institut für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der Technischen Hochschule München, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, Dezember 1973 (unveröffentlichtes Manuskript).

/134/ BOHN, Th. et al.:

Nukleare Fernwärme und Nukleare Fernenergie.

KFA Jülich, STE, IRE, HHT - JÜL-1077, Juni 1974.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Reaktorentwicklung sowie in der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung der Kernforschungsanlage Jülich.

Herrn Prof. Dr. R. Schulten möchte ich für die Themenstellung und die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit danken.

Herrn Dr. Th. Bohn danke ich für sein Interesse, seine Hilfen und die Übernahme des Korreferates.

Ferner danke ich meinen Kollegen und Freunden auch an der TH-Aachen für die anregenden Diskussionen und wertvollen Informationen.

Stefan Rath-Nagel

