

EIN ENERGIEMODELLSYSTEM ZUR ANALYSE DER ENTWICKLUNGSMÖGLICHKEITEN DER ENERGIEVERSORGUNG

A. Voss

Die in der jüngsten Zeit weltweit verstärkten Aktivitäten zur Entwicklung von Energiemodellen als Entscheidungshilfe für die Energieplanung haben ihre Ursache sicher nicht in der sogenannten Ölkrise - obwohl ein Aussenstehender diesen Eindruck gewinnen könnte -, sondern sie sind der Ausdruck der zunehmenden Erkenntnis, dass die Lösung der immer komplexer gewordenen Energieprobleme adäquater Planungs- und Entscheidungsinstrumentarien bedarf.

Der Begriff des Systems ist sicher ein Schlüsselbegriff zur Charakterisierung unserer heutigen und zukünftigen Probleme der Energieversorgung, und er ist somit natürlich auch von zentraler Bedeutung für die Beurteilung alternativer Lösungswege. Übertragen auf die Entwicklung von Energieproblemen heisst dies, dass auch sie aufbauen muss auf einem über eine bloss technische-ökonomische Betrachtung hinausgehenden Problemverständnis, welches das Energiesystem als ein in eine technisch-ökonomisch-ökologisch-gesellschaftliche Umgebung eingebettetes System erfasst, dessen Entwicklung wesentlich von seinen Wechselwirkungen mit dieser Umgebung bestimmt wird.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung und Anwendung derartiger komplexer Modelle, sowie in der Diskussion ihrer Ergebnisse, ihrer Möglichkeiten und Grenzen, tauchen immer wieder Schwierigkeiten auf, die vermieden werden könnten, wenn man sich verdeutlicht, dass ein Modell notwendigerweise immer nur ein stark vereinfachtes Abbild des realen Systems ist, dessen Vereinfachungen, oder anders ausgedrückt, dessen Elemente und Struktur im wesentlichen von der Zielsetzung des Modells, d.h. den Frage- und Problemstellungen, die mit dem Modell analysiert werden sollen, bestimmt werden.

Ein Supermodell, das Antworten auf alle Fragen gibt, wird es deshalb nicht geben. Ebenso gibt es keinen schlechthin besten methodischen Ansatz, sei es nun ein Optimierungs-, ein Input-Output- oder ein Simulationsansatz. Jede dieser Methoden hat gewisse spezifische Vor- und Nachteile, und es gilt, die geeignetste im Hinblick auf die Zielsetzung auszuwählen.

Zielsetzungen

In Abb. 1 sind stichpunktartig die übergeordneten Zielsetzungen unserer Modellentwicklung dargestellt.

Allgemeines Ziel

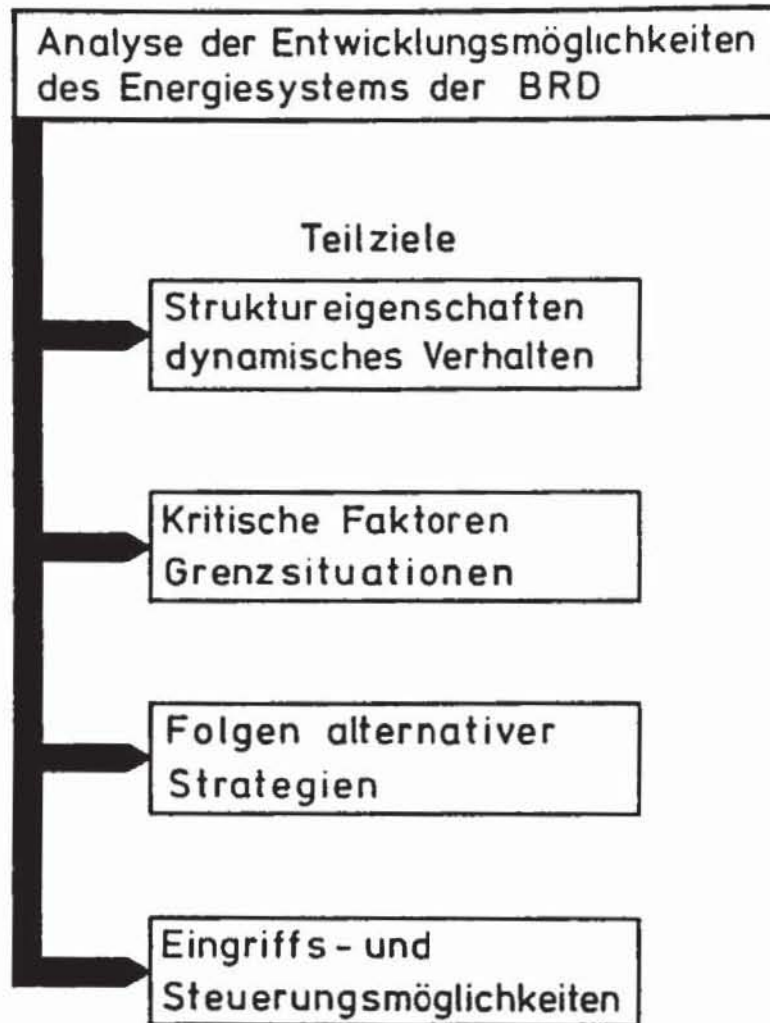


ABB. 1: ZIELSETZUNGEN DER MODELLENTWICKLUNG
(NACH KFA JÜLICH)

Das generelle Ziel der Modellentwicklungsarbeiten ist es, ein Instrumentarium für die Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten des Energiesystems der BRD zu schaffen. Dabei sollen insbesondere die Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umgebung, wie z.B. der gesamten Wirtschaft, der Gesellschaft und der Umwelt, berücksichtigt werden. Dieses allgemeine Ziel lässt sich in mehrere Teilziele aufgliedern, wie z.B.

1. Die Untersuchung der Struktureigenschaften und des dynamischen Verhaltens im Bereich Energienachfrage und Energieangebot
2. Die Erforschung und das Aufzeigen von Grenzsituationen und kritischen Zuständen, z.B. die Untersuchung der Auswirkungen einer Versorgungskrise

3. Das Aufzeigen der Folgen und die Bewertung alternativer Energieversorgungsstrategien
4. Die Untersuchung von Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten, wie z.B. der Veränderung des wirtschaftlichen Wachstums oder der Einführung von Energiesparmassnahmen.

Modellbank

Den genannten Teilzielen ist jeweils eine Reihe von Unterzielen zugeordnet. Diese Zielsetzungen sollen nun nicht mit einem einzigen Modell, sondern mit einem Satz von Modellmodulen oder Teilmodellen erreicht werden, welche in einer Art Modellbank (Abb. 2) gespeichert sind und jeweils entsprechend der Frage- oder Problemstellung zusammengekoppelt werden.

Für die verschiedenen, im Rahmen einer Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten des Energiesystems wichtigen Sektoren und Bereiche sind in der Modellbank verschiedene Module für diesen Sektor oder Teilbereiche davon abgespeichert.

WIRTSCHAFT - SEKTORALES WIRTSCHAFTS- MODELL - I-O-MODELL - KAPITALBEDARFSMODELL	ENERGIEBEDARF - SEKTORALES ENERGIEBEDARFS- MODELL - SUBSTITUTIONSMODELL	
UMWELT - EMISSIONSMODELL - IMMISSIONSMODELL	ENERGIEVERSORGUNG - ENERGIEFLUSSMODELL - OPTIMIERUNGSMODELL DER E-VERSORGUNG	
GLOBALE MODELLE - ENERGIEMODELL - GLOBALE SCHADSTOFFMODELLE (CO ₂ , TRITIUM, C14)	REGIONALE MODELLE - STANDORTMODELL - ENERGIEVERTEILUNGSMODELL	
DATENDATEI	STEUERMODULE	AUSWERTEMODULE

ABB. 2: MODELKBANKKONZEPT (NACH KFA JÜLICH)

Diese einzelnen Module sind einmal spezielle Submodelle für wichtige Teilaspekte in diesem Sektor, z.B. das Finanz- und Kapitalbedarfsmodell als Teilmodul des Wirtschaftssektors, und zum anderen unterscheiden sie sich hinsichtlich ihrer Detaillierung und Disaggregation, sowie hinsichtlich ihres methodischen Ansatzes. So soll z.B. für den Energieversorgungssektor neben einem detaillierten Flussmodell auch ein Optimierungsmodell, das für einen gegebenen Endenergiebedarf die optimale Deckungsstrategie ermittelt, zur Verfügung stehen.

Neben diesen einzelnen sektoralen Teilmodulen, die natürlich untereinander kompatibel sein müssen, wird dann noch eine Reihe von Zugriffs-, Steuer- und Auswerteprogrammen für die Durchführung der Modellrechnungen benötigt. Ein weiterer Baustein einer solchen Modellbank könnte dann noch eine Daten-Datei sein, die die Standarddaten für die einzelnen Modelle enthält.

Ein derartiges Modellbanksystem ist grösstenteils noch Zukunftsmusik. Es deutet aber an, vor welchem Hintergrund und in welche Richtung wir unsere Modellentwicklungsarbeiten, die wir ohnehin als einen kontinuierlich fortlaufenden Prozess verstehen, vorantreiben.

Globale Energiemodelle

Nach der Erläuterung der Zielrichtung und Zukunftsaspekte unserer Modellentwicklungsaktivitäten möchte ich nun die Modelle und Teilmodelle näher erläutern, die wir bereits entwickelt haben.

Begonnen haben wir unsere Arbeiten mit Modellen zur Analyse der weitweiten Energieprobleme, und zwar aus den folgenden zwei Gründen:

1. In der Regel sind geschlossene Systeme - und die Welt kann man als ein solches auffassen - leichter in einem Modell abzubilden und
2. sind natürlich die weitweiten Entwicklungen dominant auch für die Entwicklung des Energiesystems in der Bundesrepublik Deutschland. So haben z.B. die Erschöpfung der Erdölreserven oder die Preisentwicklung des Erdöls einen grossen Einfluss auf die Energiewirtschaft der BRD. Beide werden aber nur in geringem Masse von der BRD selbst beeinflusst.

Ziel der Modellentwicklung auf dieser globalen Ebene ist es unter anderem, ein Instrument für die Analyse der Entwicklung der Grössen und Faktoren zu haben, die später als exogene Grössen in die Modelle der BRD eingehen. So entstanden Modelle zur Untersuchung der langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten des Weltenergiesystems, wie auch Modelle für die globalen Schadstoffkreisläufe für CO₂, Tritium und C14. Auf diese Modelle will ich hier aber nicht näher eingehen.

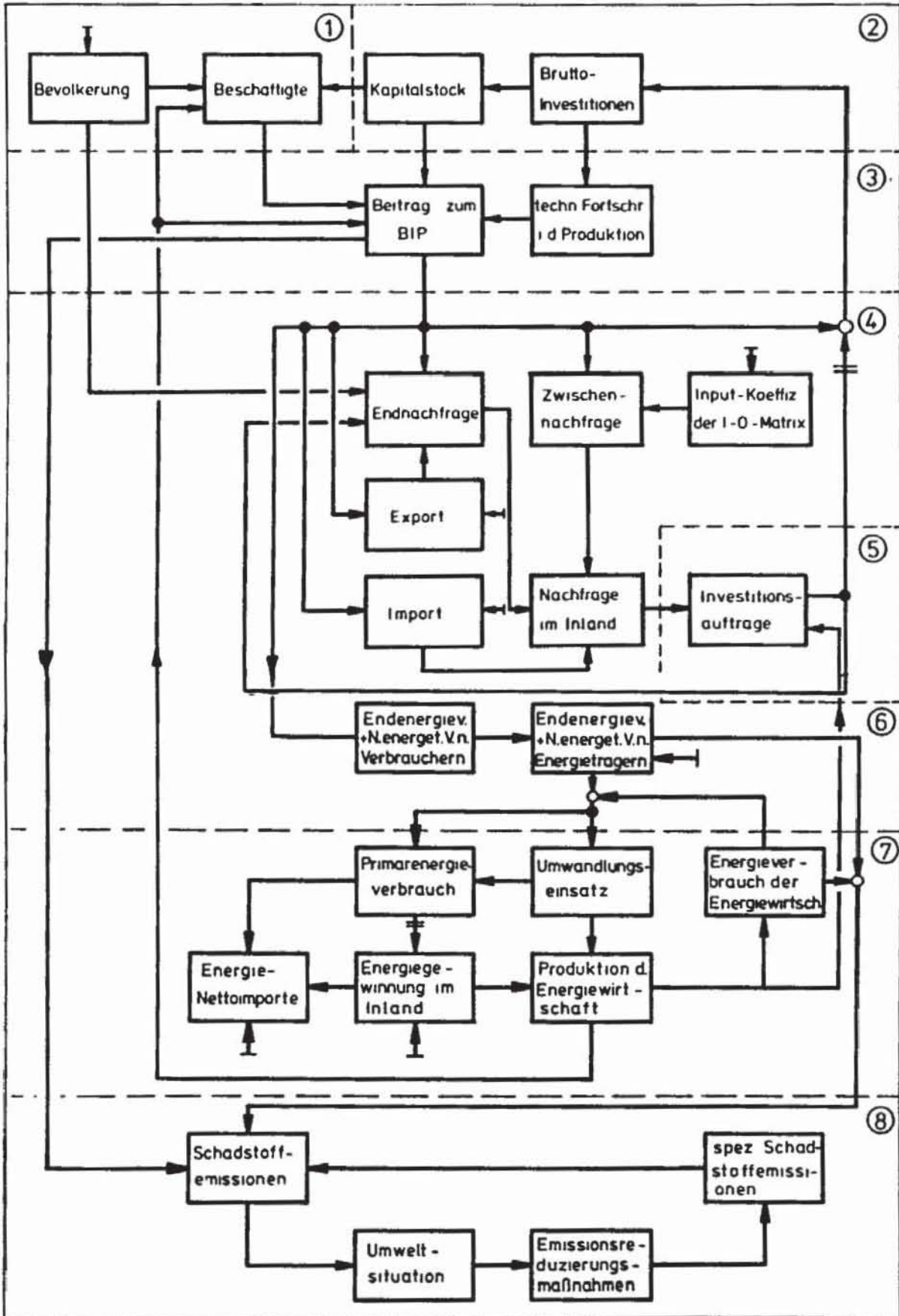


ABB. 3: GRUNDSTRUKTUR DES ENERGIEMODELLS

Energiemodell der BRD

Parallel zu diesen Aktivitäten auf globalem Niveau wurde die Erstellung von Energiemodellen für die Bundesrepublik Deutschland in Angriff genommen. Abb. 3 zeigt die Grundstruktur, d.h. die wichtigsten Elemente und ihre Verknüpfung, sowie die Teilmodule des Energiemodells der BRD in seiner jetzigen Ausbaustufe.

Aus Gründen der Überschaubarkeit ist die Modellstruktur in 8 Sektoren eingeteilt. Sektor 1 ist der Bevölkerungs- und Beschäftigungssektor. Der Kapitalektor ist hier mit 2 bezeichnet. Sektor 3 ist der Produktionssektor; der Nachfrage- bzw. der Investitionssektor haben die Numerierung 4 und 5. Mit 6 ist der Energieverbrauchssektor bezeichnet und die Energieversorgung bildet Sektor 7. Der achte und letzte Sektor ist der Umweltsektor.

Will man, wie in den Zielen erläutert, das dynamische Verhalten im Bereich der Energienachfrage darstellen, so ist zunächst nach den Determinanten des wirtschaftlichen Wachstums zu fragen. Für eine detaillierte Erklärung der wirtschaftlichen Entwicklung ist neben der Beschreibung der Wachstumsprozesse auch die Darstellung von Strukturänderungen zwischen den einzelnen Wirtschaftsgruppen erforderlich. Es wurde daher ein Ansatz gewählt, der von einer Disaggregation der Wirtschaft in sechs Bereiche ausgeht. Es sind dies zunächst einmal vier industrielle Bereiche, nämlich die

- Industrie der Steine und Erden (STE)
- die eisenschaffende Industrie (ESC)
- die chemische Industrie (CHE)
- und die sonstigen Industriebereiche, die den Rest der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie sowie alle anderen Industriegruppen umfassen (AIB);

dann der Bereich der Energiewirtschaft, der in sechs Untergruppen unterteilt wurde, und schliesslich ein Bereich, zu dem alle Unternehmen gerechnet werden, die weder der Industrie noch der Energiewirtschaft angehören (AW).

Der Energieverbrauch wird im Sektor 6 für die eben erwähnten 4 Industriegruppen sowie für den Verkehr - nach Güter- und Personenverkehr getrennt - und für den Bereich der Haushalte einerseits, den des Kleinverbrauchs andererseits ermittelt. Dabei werden beim derzeitigen Ausbauzustand des Modells elf verschiedene Sekundärenergieträger und sechs verschiedene Primärenergieträger betrachtet.

Der Umweltsektor dient im wesentlichen dazu, die Emissionen für acht Schadstoffe zu ermitteln.

Im folgenden soll die Struktur im einzelnen erläutert werden.

Im Bevölkerungssektor wird die Zahl der Beschäftigten in den einzelnen Bereichen auf der einen Seite durch das Arbeitskräfteangebot, das aus der Bevölkerungszahl und vorgege-

benen Erwerbsquoten ermittelt wird, und auf der anderen Seite durch die Arbeitskräftenachfrage der Unternehmen festgelegt. Die Arbeitskräftenachfrage ist dabei von den Produktionsbedingungen in den einzelnen Bereichen abhängig.

Im zweiten Sektor wird der Produktionsfaktor Kapital, gerechnet in realen Preisen für die einzelnen Wirtschaftsbereiche, bestimmt. Der Kapitalstock vermehrt sich dabei um die Bruttoinvestitionen und vermindert sich um die abnutzungsbedingten Abschreibungen, die in die Abbildung aus Vereinfachungsgründen nicht aufgenommen wurden.

Beschäftigte und eingesetztes Produktionskapital sind Produktionsfaktoren, durch deren Einsatz das Produktionsergebnis, gemessen als Beitrag zum Bruttoinlandprodukt, bestimmt wird. Als dritte den Produktionsoutput bestimmende Grösse wirkt der technische Fortschritt. Der Beitrag zum Bruttoinlandprodukt bzw. die Nettoproduktion der einzelnen Bereiche wird durch eine Produktionsfunktion vom Cobb-Douglas-Typ ermittelt.

Aufgabe des vierten Sektors, des Nachfragesektors, ist die Ermittlung der Nachfrage in den einzelnen Wirtschaftsbereichen. Die gesamte Nachfrage setzt sich dabei aus der End-, Zwischen- und Importnachfrage zusammen. Die Endnachfrage besteht dabei wieder aus vier Komponenten:

- dem privaten und dem öffentlichen Verbrauch
- der Investitionsgüternachfrage
- und dem Export.

Die einzelnen Komponenten der Endnachfrage werden dabei im Falle des privaten und öffentlichen Verbrauchs indirekt aus dem Bruttoinlandprodukt und - für den Export - über vorgegebene Exportquoten ermittelt. Die Investitionsgüternachfrage wird in Sektor fünf determiniert, auf den ich gleich noch zu sprechen komme.

Die für die Befriedigung der Endnachfrage notwendigen Vorleistungen der einzelnen Wirtschaftsbereiche, d.h. die Zwischenachfrage der Produktionsbereiche, wird mit einer auf die sechs Wirtschaftsbereiche aggregierten Input-Output-Matrix errechnet.

Hat man die Nachfrage berechnet, so lassen sich die Investitionsentscheidungen der Unternehmer auf Grund einer auf der vergangenen Entwicklung aufbauenden Nachfrageeinschätzung festlegen, wenn man einmal von anderen das Investitionsverhalten beeinflussenden Faktoren absieht. Die Investitionsaufträge werden also durch die für die Deckung einer bestimmten erwarteten Nachfrage erforderliche Veränderung des Kapitalstocks ermittelt.

Die so determinierten Investitionsaufträge beeinflussen dabei in zweierlei Weise das gesamte Wachstumsverhalten. Einerseits stellen sie selbst einen Teil der Endnachfrage dar und andererseits vermehren die fertiggestellten Investitionsgüter den Produktionsfaktor Kapital. Dabei schliesst sich hier ein wichtiger Regelkreis, der von den Investitionen, über den Kapitalstock, den

Beitrag zum BIP und die Nachfrage wieder zu den Investitionsaufträgen führt.

Im Sektor sechs, dem Energieverbrauchssektor, werden die in der Industrie, in den Haushalten, bei den Kleinverbrauchern und im Verkehr verbrauchten Energiemengen errechnet. Dabei wird für die schon erwähnten 4 industriellen Bereiche der energetische vom nicht-energetischen Verbrauch unterschieden. Bei den Haushalten wird eine Trennung nach den Verwendungszwecken Raumheizung und übriger Energieverbrauch vorgenommen, und im Verkehr wird der Energieverbrauch den einzelnen Verkehrsträgern der Bereiche Personen- und Güterverkehr zugeordnet.

Als Bestimmungsgrößen für den industriellen Energieverbrauch werden die jeweiligen Produktionszahlen verwendet. Der Energieverbrauch der Haushalte, der Kleinverbraucher und des Verkehrs wird erklärt durch aus der wirtschaftlichen Entwicklung abgeleitete Größen, wie das verfügbare Einkommen, den Wohnungsbestand und das Verkehrsaufkommen. Der so ermittelte Endenergieverbrauch wird anschliessend durch Strukturfaktoren auf die angebotenen Endenergeträger aufgeteilt.

Die wesentlichste Aufgabe des Energieversorgungssektors besteht in der Bestimmung des für einen bestimmten Verbrauch an Endenergie notwendigen Primärenergieeinsatzes. Dabei wird ein Teil der Endenergie über die verschiedenen Umwandlungsverfahren aus der Primärenergie gewonnen, z.B. Strom aus Kohle, Wasserkraft oder Kernenergie, und der andere Teil der Endenergie wird von den nicht umgewandelten Primärenergieträgern gestellt; dies ist z.B. bei der direkten Nutzung des Erdgases zur Raumheizung der Fall. Ausserdem ist hierbei noch der Energieverbrauch der Energiewirtschaft, also die Energie, die in den verschiedenen Stufen der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung selbst verbraucht wird, zu berücksichtigen.

Die Produktion der Energiewirtschaft erfordert ebenso wie die Produktion in den anderen Wirtschaftsbereichen den Einsatz von Beschäftigten, von Kapital und die Bereitstellung von Vorleistungen zur Befriedigung ihrer Zwischennachfrage. Andererseits trägt auch die Energiewirtschaft zur Einkommensschaffung und zum Bruttoinlandprodukt bei und ihre Investitionsaufträge sind Teil der Endnachfrage. Hier erfolgt also wieder die Kopplung der Energiewirtschaft, die aus Gründen einer detaillierten energetischen Betrachtung gesondert behandelt wird, an die anderen Wirtschaftsbereiche und an die im Modell dargestellten wirtschaftlichen Entwicklungsmechanismen.

Mit Hilfe der industriellen Produktion und des Energieverbrauchs (nach Energieträgern und Verbrauchssektoren) werden schliesslich im Umweltsektor - über spezifische Emissionsfaktoren - die Freisetzungsmengen der wichtigsten Schadstoffe bestimmt. - Soviel zur Erklärung der Grundstruktur.

Energieverbrauch im Bereich Haushalte und Kleinverbrauch

Die einzelnen Sektoren oder Teilmodelle sind strukturell noch weiter aufgediebert. Dies soll exemplarisch an der Detailstruktur des Subsektors Energieverbrauch der Haushalte und Kleinverbraucher erläutert werden.

Der gesamte Energieverbrauch dieses Subsektors setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

1. dem Energieverbrauch der privaten Haushalte für die Raumheizung,
2. dem übrigen Energieverbrauch der privaten Haushalte, z.B. für Licht, Kraft usw. und
3. dem Energieverbrauch der Kleinverbraucher.

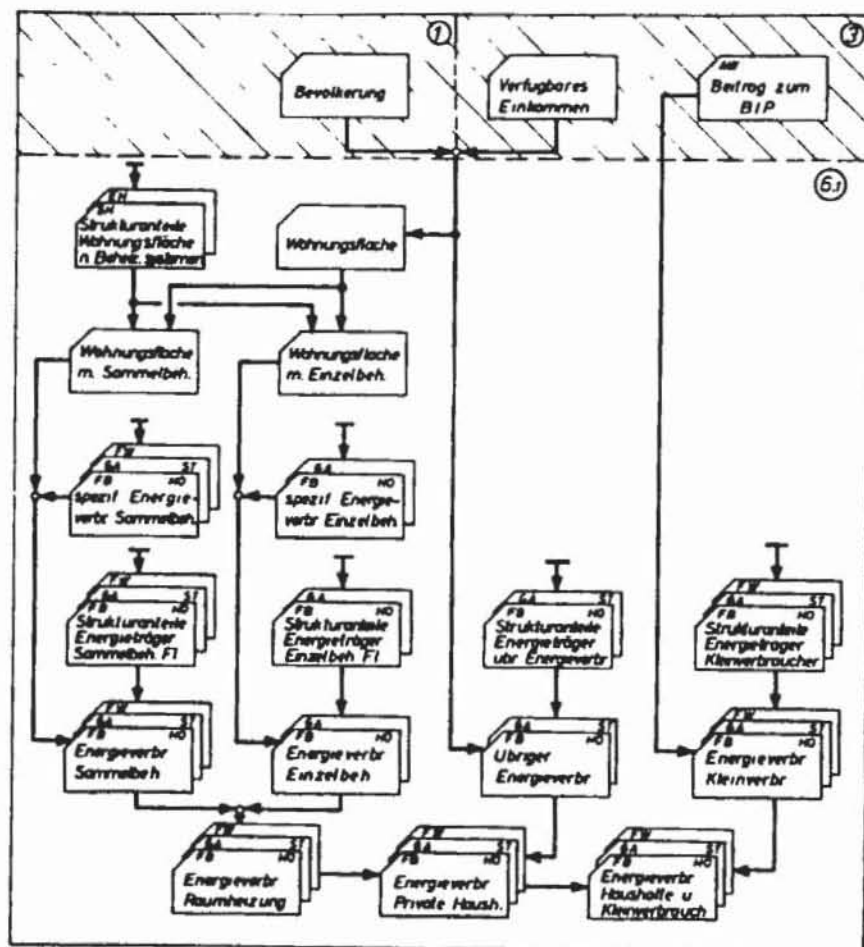


ABB. 4: DETAILSTRUKTUR ZUR ERMITTLUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS IM SEKTOR HAUSHALTE UND KLEINVERBRAUCH (NACH KFA JÜLICH)

Als Erklärungsgrößen für den Energieverbrauch der privaten Haushalte werden die Bevölkerungszahl und das verfügbare Einkommen benutzt. Der Energieverbrauch für die Raumheizung wird ausgehend von der Wohnungsfläche, die unterteilt wird in sammel- und einzelbeheizte Wohnungen, und den jeweiligen spezifischen Energieverbräuchen der verschiedenen Heizungssysteme ermittelt. Der übrige Energieverbrauch der privaten Haushalte sowie der Energieverbrauch der Kleinverbraucher wird direkt mit dem Einkommen bzw. dem Beitrag zum BIP korreliert.

Lassen Sie mich nun den erarbeiteten Ansatz noch einmal zusammenfassend kennzeichnen.

1. Es handelt sich um ein quasi geschlossenes, dynamisches Simulationsmodell.
2. Die Produktion wird für sechs Wirtschaftsbereiche mit Hilfe einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion berechnet.
3. Die intersektorale Verflechtung wird durch eine Input-Output-Matrix dargestellt.
4. Der Energieverbrauch wird für die einzelnen Verbrauchsgruppen durch aus der wirtschaftlichen Entwicklung abgeleitete Faktoren, wie Produktionsziffern, Einkommen, Wohnungsbestand, Verkehrsaufkommen, errechnet.
5. Die Energieversorgung wird mit Hilfe eines detaillierten Energieflussmodells dargestellt.
6. Die Simulation alternativer Strategien oder Szenarien und das Aufzeigen ihrer Auswirkungen erfolgt durch Parametervariation.

Modellverifikation

Bevor ich nun exemplarisch einige Ergebnisse der mit diesem Modell durchgeführten Rechnungen vorstelle, möchte ich noch zwei Anmerkungen machen. Die erste bezieht sich auf die Modellergebnisse und die zweite auf die Modellverifikation.

Es ist nicht das primäre Ziel der Modellentwicklung, Prognosen zu liefern, sondern es sollen vielmehr die Folgen alternativer Entscheidungen aufgezeigt und Strategien entwickelt werden, mit denen sich energiepolitische Ziele erreichen lassen.

Zur Überprüfung der Modellstruktur und des Modellverhaltens haben wir zahlreiche Tests durchgeführt. Dies waren vor allem - neben der Analyse des generellen Systemverhaltens über die Ermittlung der Stossantwort des Systems auf eine zuvor festgelegte Veränderung wichtiger Parameter - Tests zur Teilverifizierung des Modells an der vergangenen Entwicklung.

In Abb. 5 sind nun für zwei Modellgrößen, den Primärenergieverbrauch und die Primärenergiegewinnung im Inland, der reale und der mit dem Modell errechnete Verlauf für den Zeitraum von 1950-1972 dargestellt.

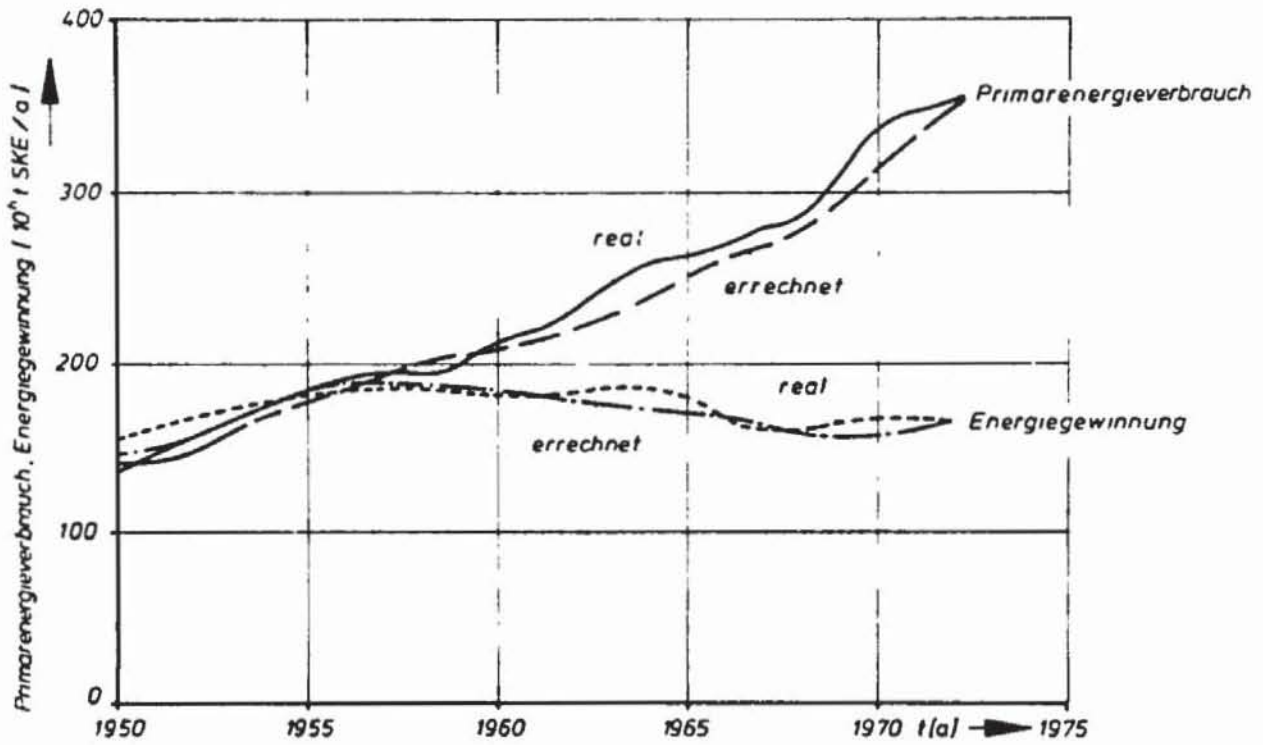


ABB. 5: MODELLVERIFIKATION-ENERGIEVERBRAUCH UND -GEWINNUNG (NACH KFA JÜLICH)

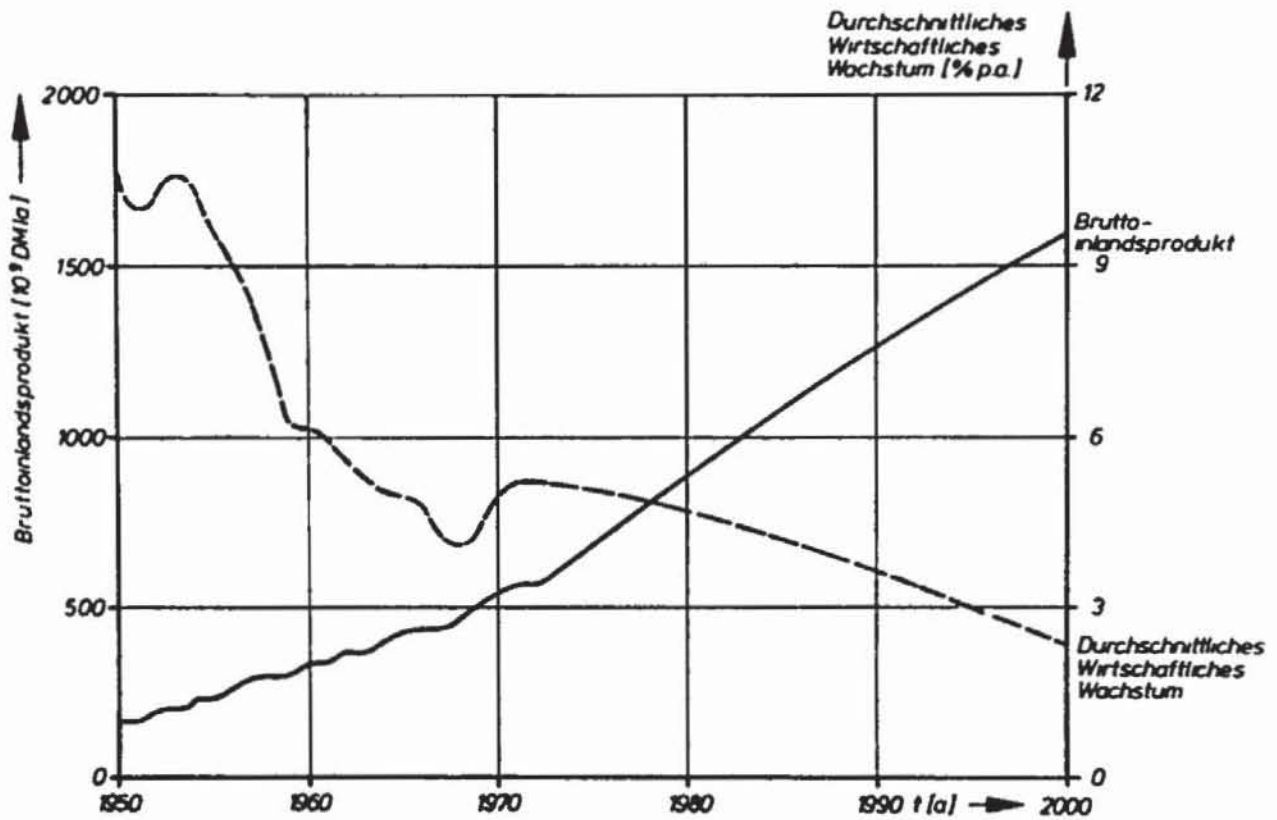


ABB. 6: STANDARDFALL: WIRTSCHAFTLICHE ENTWICKLUNG (NACH KFA JÜLICH)

Eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen realen und errechneten Werten ergab sich auch bei den anderen wichtigen Modellgrößen, wie z.B. dem Bruttoinlandprodukt, dem Kapitalstock und den Beschäftigten.

Standardfall

Abb. 6 zeigt die Veränderung des Wirtschaftswachstums und die Entwicklung des Bruttoinlandproduktes bis zum Jahr 2000 für den sogenannten Referenz- oder Standardfall. Die Ergebnisse dieses Referenzfalles sind in keiner Weise gegenüber den Resultaten anderer Strategieläufe ausgezeichnet. Sie dienen lediglich als Vergleichsbasis bei der Diskussion der Auswirkungen anderer Strategien.

Der in diesem Standardfall dargestellten Entwicklung liegen die folgenden Voraussetzungen zu Grunde:

Es wird eine möglichst gleichmäßige und stabile Entwicklung innerhalb der gesamten Volkswirtschaft angestrebt. Dazu wird eine kontinuierliche, ungestörte Energieversorgung vorausgesetzt. Das Bruttoinlandprodukt würde unter dieser Hypothese von etwa 700×10^9 DM 1974 auf ca. 1600×10^9 DM im Jahre 2000 (in Preisen von 1962) ansteigen, - allerdings mit einer im selben Zeitraum von durchschnittlich 4,5% auf 2,5% verringerten Wachstumsrate.

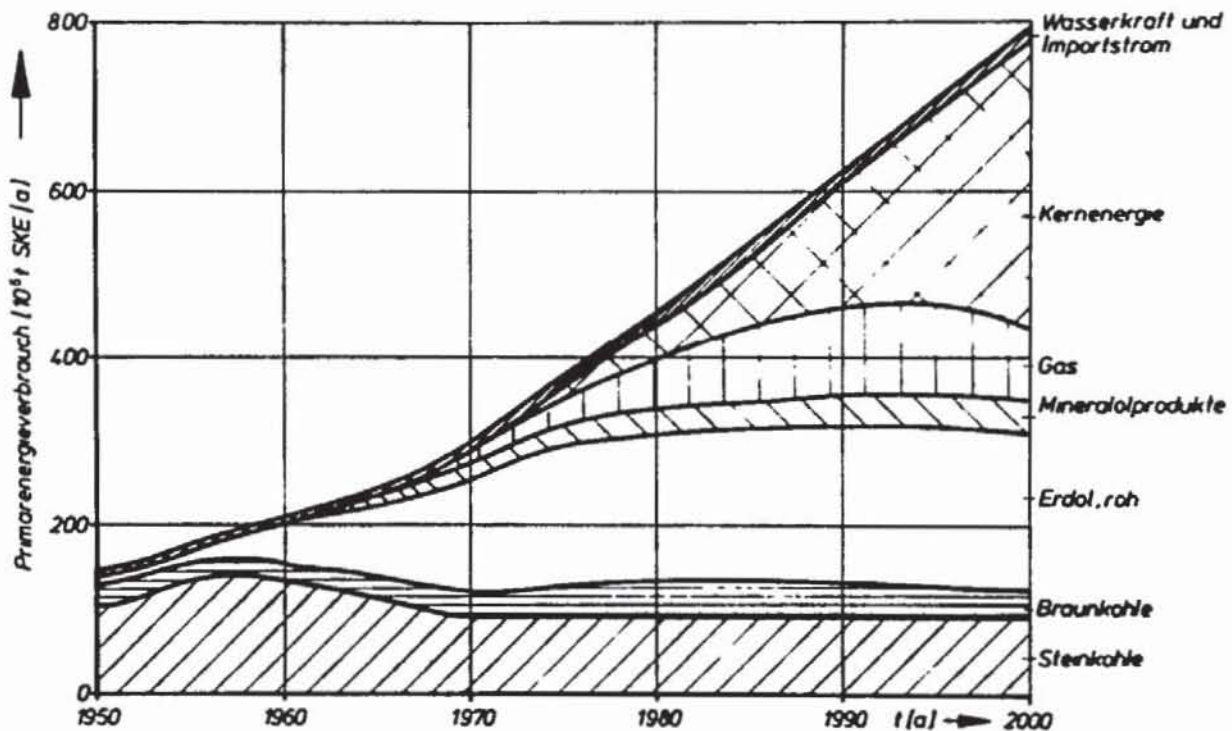


ABB. 7: STANDARDFALL: ENTWICKLUNG DES PRIMÄRENERGIEVERBRAUCHS (NACH KFA JÜLICH)

Abb. 7 zeigt den dieser wirtschaftlichen Entwicklung entsprechenden Verbrauch an Primärenergie. Bei der hier zu Grunde gelegten kontinuierlichen, ungestörten Entwicklung der Energieversorgung wurde unterstellt, dass aus Gründen der längerfristigen Stabilisierung des Energiemarktes ein relativer Rückgang des Erdölanteils zugunsten anderer Energieträger angestrebt wird. Dabei steht die forcierte Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung im Vordergrund. Neue Energietechnologien, wie z.B. die Kohlevergasung, nukleare Fernenergie oder die Nutzung der Wind- oder Sonnenenergie sind dabei nicht berücksichtigt worden.

Der Primärenergieverbrauch steigt unter den für den Standardfall geltenden Prämissen auf fast 800×10^6 t SKE im Jahre 2000 an, also mit rund 3% Wachstum jährlich.

Der mit dieser Entwicklung verbundene Strukturwandel in der Energieversorgung führt zu einer Veränderung in der Abhängigkeit von Energieimporten (Abb. 8).

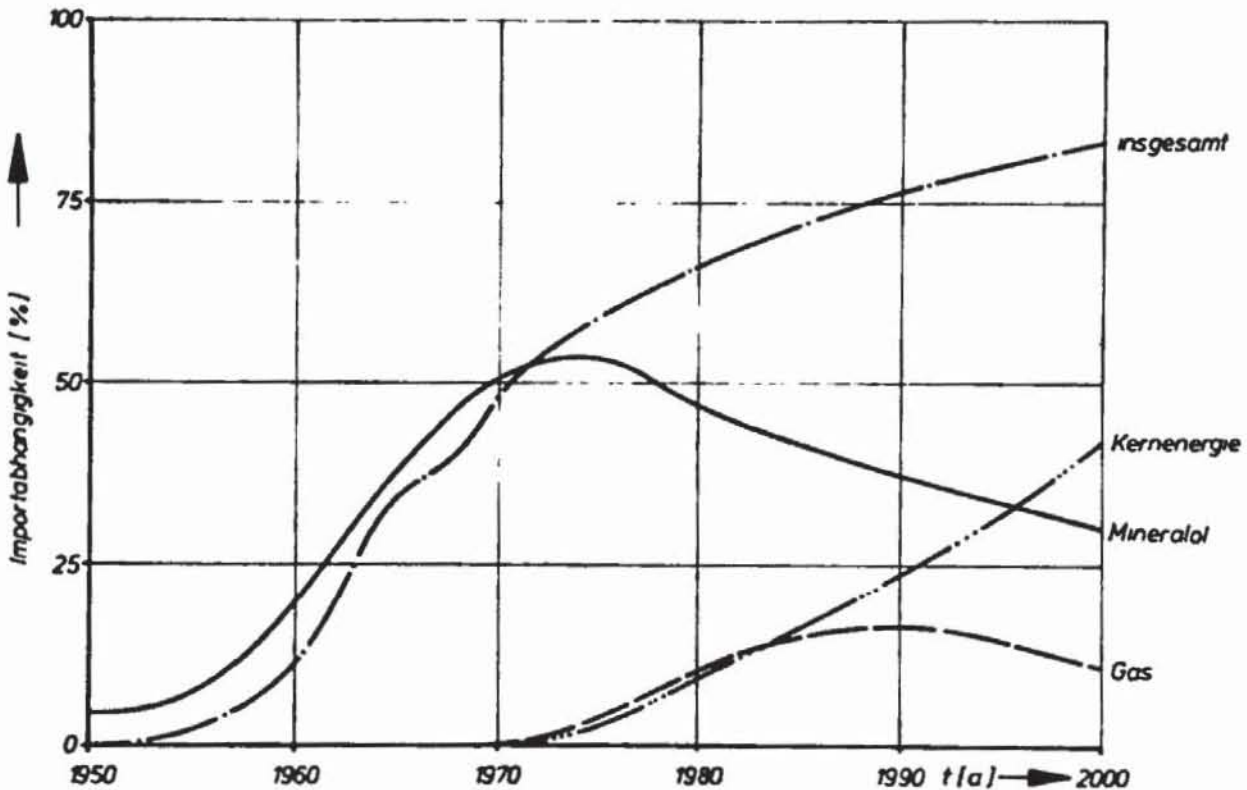


ABB. 8: STANDARDFALL: ENTWICKLUNG DER IMPORTABHÄNGIGKEIT (NACH KFA JÜLICH)

Die Importabhängigkeit nimmt bis zum Jahr 2000 stetig zu und erreicht etwa einen Anteil von 80%. Allerdings ist das mit dieser Abhängigkeit verbundene Versorgungsrisiko wegen der unterschiedlichen Versorgungsstruktur im Jahre 2000 ganz anders zu bewerten als heute: Die Importabhängigkeit von Energieträgern,

die überwiegend aus politisch instabilen Regionen bezogen werden - Erdgas und Mineralöl -, nimmt bei dem in dieser Rechnung angenommenen Strukturwandel allmählich ab, während die Einfuhrabhängigkeit von Kernenergie im gleichen Zeitraum stark zunimmt.

Abweichungen vom Standardlauf I: Energieeinsparung

Neben diesem Standardlauf haben wir eine Reihe von Fragestellungen, wie z.B. die Auswirkungen eines veränderten wirtschaftlichen Wachstums, die Einführung von Energiesparmassnahmen, die Einführung neuer Energietechnologien usw., untersucht, von denen ich nur zwei näher erläutern will.

Das erste Beispiel stammt aus dem Bereich der Energieeinsparung. Die Fragestellung lautete: Welche Einsparungen an Energie sind im Raumheizungsbereich der privaten Haushalte durch bessere Isolierungen tatsächlich zu erzielen, wenn man den für die Isolationsmassnahmen notwendigen Energieaufwand mitberücksichtigt.

Ein Ergebnis dieser Untersuchung zeigt die Abb. 9. Hier ist die Entwicklung des jährlichen Raumheizwärmebedarfs der privaten Haushalte einmal ohne und einmal mit zusätzlichen Wärmedämmmassnahmen aufgetragen. Dieser Modellrechnung liegt die Annahme zu Grunde, dass bis zum Jahre 2000 für 85% aller Wohnungen zusätzliche Wärmedämmmassnahmen eingeführt werden, die zu einer 30%igen Verringerung des spezifischen Wärmebedarfs führen.

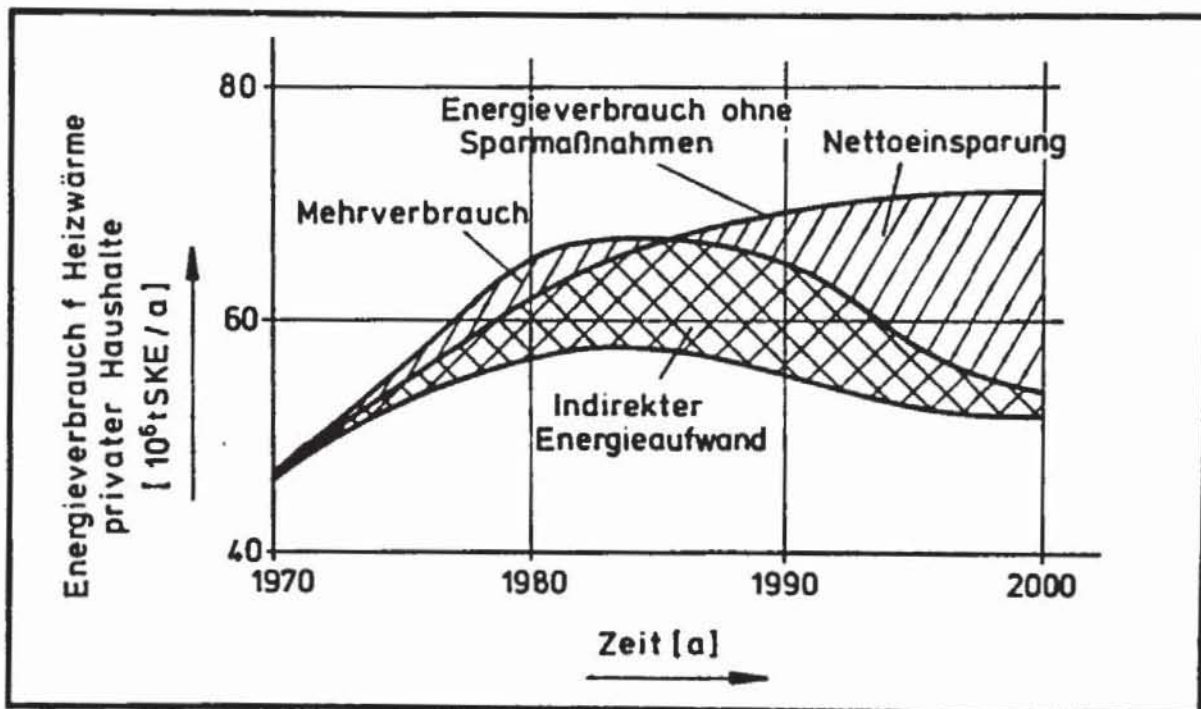


ABB. 9: ENERGIEVERBRAUCH FÜR HEIZWÄRME PRIVATER HAUSHALTE BEI SPARMASSNAHMEN; WÄRMEDÄMMUNG (NACH KFA JÜLICH)

Die Ergebnisse dieser Rechnungen zeigen, dass durch den indirekten Energieaufwand, der bei der Produktion der Isolationsmaterialien anfällt, in den ersten zehn Jahren zunächst einmal mehr Energie verbraucht wird, als wenn diese zusätzlichen Dämmmaßnahmen nicht eingeführt würden. Erst nach 1985 würden die eingeleiteten Sparmaßnahmen energetisch zum Tragen kommen. Die Ergebnisse dieser Rechnung sprechen natürlich nicht gegen eine bessere Isolierung von Häusern, sondern zeigen nur, dass auch diese Maßnahmen energetisch nur mit einem gewissen Verzögerungseffekt wirksam werden können.

Abweichungen vom Standardlauf II: Versorgungskrise

Als zweites Beispiel möchte ich nun Modellrechnungen erläutern, die sich mit den Auswirkungen von plötzlichen Versorgungsstörungen befassen.

Abb. 10 zeigt die Auswirkungen einer im Jahre 1980 plötzlich auftretenden hypothetischen Lieferkürzung von Mineralöl.

Im einzelnen wurde folgender Ablauf dieses hypothetischen Krisenfalls unterstellt:

- Die 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 Inlandmarkt um ein Drittel kleiner als die Nachfrage.
- Während einer kurzen Übergangszeit, die durch das Aufbrauchen der Lager bei Verbrauchern, Händlern und Raffinerien gekennzeichnet ist, werden administrative Verbrauchsbeschränkungen erlassen. 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.

Diese administrativen Massnahmen bedeuten für die privaten Haushalte einen Konsumverzicht; im Produktionssektor kann der Verbrauch aber nur dadurch reduziert werden, dass die Auslastung des Produktionspotentials, d.h. die Produktion selbst, zurückgenommen wird.

In allen Verbrauchssektoren laufen gleichzeitig Prozesse für die Substitution des Öls an. Es wird dabei angenommen, dass sich die durchschnittliche Substitutionszeit infolge der Krisensituation stark verringert.

Die Auswirkungen der Krise verursachen einen Produktionsrückgang und führen zu einer starken Rezession des Bruttoinlandproduktes (wieder gemessen in Preisen von 1962). Selbst sofort einsetzende Substitutionsmaßnahmen können das wirtschaftliche Wachstum erst ein Jahr später stabilisieren. Das Bruttoinlandprodukt ist innerhalb eines Jahres von ca. 850×10^9 DM auf 700×10^9 DM

zurückgefallen; es werden weitere viereinhalb Jahre benötigt, um die vor der Störung jährlich erbrachte volkswirtschaftliche Leistung wieder zu erreichen. Der am Bruttoinlandsprodukt gemessene volkswirtschaftliche Verlust würde sich für den Zeitraum von 5 1/2 Jahren etwa auf 825 Milliarden DM belaufen (ermittelt in Preisen von 1962). - Soviel zur Versorgungskrise.

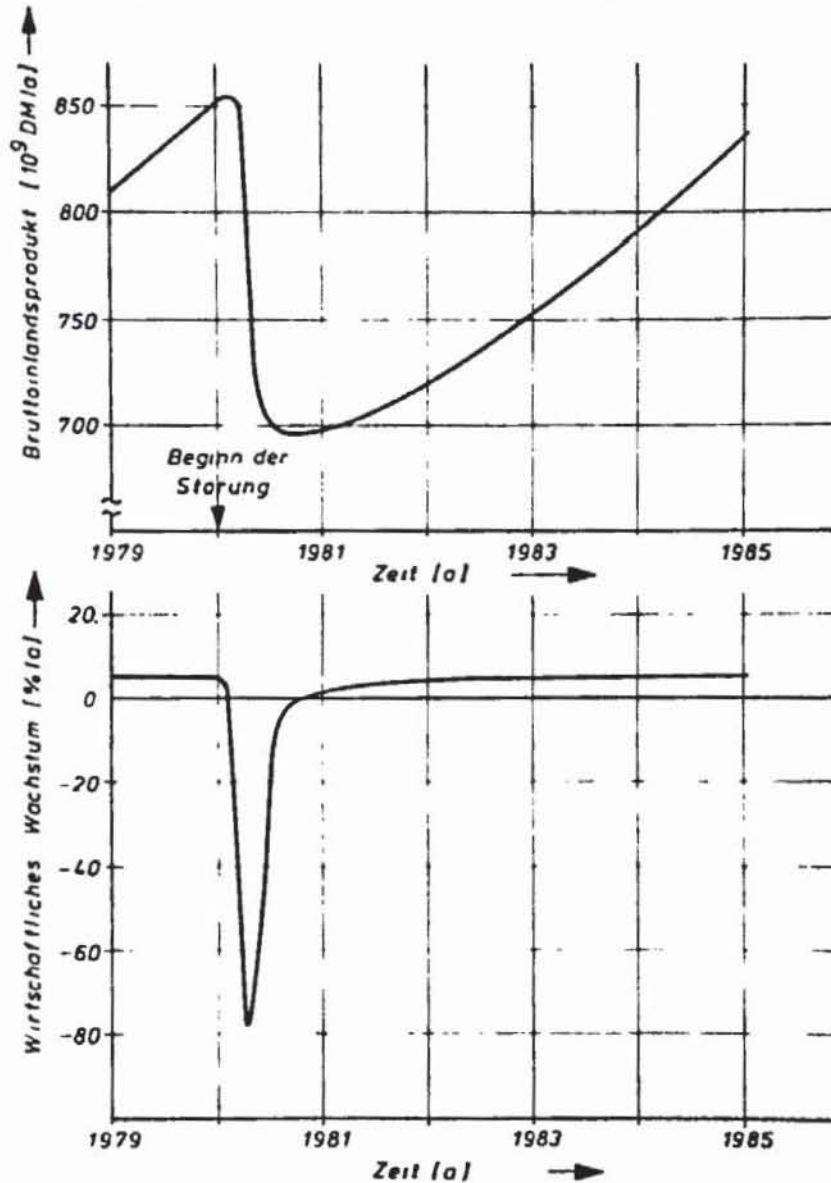


ABB. 10: VERSORGUNGSKRISE (NACH KFA JÜLICH)

Teilmodelle I: Substitutionsprozesse

Das Modell, oder besser gesagt: die Teilmodelle, die ich soeben erläutert habe, stellen die erste Entwicklungsstufe in unserer Modellentwicklung dar.

Ich will nun noch kurz über die zur Zeit in Entwicklung befindlichen Teilmodelle berichten, die die Aussagemöglichkeit unseres Modellsystems schrittweise erweitern sollen.

Ein wichtiger Punkt im Rahmen der Analyse von Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft ist die Beschreibung der nachfrageseitig ausgelösten Substitutionsvorgänge zwischen den verschiedenen Endenergieträgern. Die Probleme die bei der Quantifizierung von Substitutionsprozessen auftreten, liegen darin begründet,

- dass meist mehr als zwei Energieträger in Konkurrenz stehen,
- dass gerade bei der Auswahl von Energieträgern neben den Kosten auch andere Faktoren, wie z.B. die Bequemlichkeit und Sauberkeit in der Nutzung der Energieträger, eine Rolle spielen,
- und dass Substitutionsvorgänge ausnahmslos dynamischer Natur sind.

Die bisher in der Ökonometrie verwendeten Ansätze, die der Beschreibung von Substitutionsprozessen dienen, wie die Kreuzpreiselastizität, die Substitutionselastizität oder der exogen vorgegebene, quasi eigengesetzliche zeitliche Verlauf der Substitution, scheinen für die Darstellung der Substitutionsvorgänge wenig geeignet zu sein. Wir haben deshalb einen Ansatz entwickelt, der versucht, die Substitutionsmechanismen, d.h. die Determinanten und Antriebskräfte der Substitution und ihre Dynamik, zu beschreiben. Dieser Ansatz verwendet ein System gekoppelter Differentialgleichungen zur Beschreibung der Substitutionsdynamik und einen Nutzwertansatz zur Erfassung des Einflusses der verschiedenen Bestimmungsgrößen der Substitution.

Die Grundgleichung unseres Ansatzes der Substitutionsdynamik sieht folgendermassen aus:

$$\text{wobei} \quad a \frac{d^3 m_i}{dt^3} + b \frac{d^2 m_i}{dt^2} + \tau \frac{dm_i}{dt} + m_i = \overline{GN}(t)$$

$$\overline{GN}_i(t) = \frac{GN_i(t)}{\sum_i GN_i(t)}$$

$$GN_i(t) = \sum_{j=1}^m g_j(t) \cdot N_{i,j}(t)$$

- m_i = Anteil des Energieträgers i am Gesamtverbrauch
- τ = durchschnittliche Substitutionszeit
- a = $\tau^3/27$
- b = $\tau^2/3$
- $GN_i(t)$ = zeitabhängiger Gesamtnutzen des Energieträgers i
- $g_j(t)$ = Gewichtungsfaktor des Indikators j
- $N_{i,j}(t)$ = Nutzen des j -ten Indikators des Energieträgers i

Die Änderung des Marktanteils m_i eines Energieträgers wird hier durch eine Differentialgleichung dritter Ordnung beschrieben,

wobei GN_i , der zeitabhängige Nutzen dieses Energieträgers, der erklärende Faktor ist. t repräsentiert in diesem Ansatz die durchschnittliche Substitutionszeit. Die Grösse GN_i stellt, wie gesagt, den zeitabhängigen Gesamtnutzen des Energieträgers i dar. Bei seiner Ermittlung werden neben dem Preis noch andere Faktoren, wie z.B. die Bequemlichkeit der Handhabung dieses Energieträgers, berücksichtigt. Die Brauchbarkeit dieses Ansatzes zur Beschreibung von Substitutionsvorgängen haben wir an verschiedenen Beispielen überprüft. Die dabei erzielten Ergebnisse waren zufriedenstellend, so dass wir ihn jetzt zu einem Substitutionsmodell ausbauen.

Teilmodelle II: Optimale Energieversorgungsstruktur

Der zweite wichtige Bereich der Modellweiterentwicklung umfasst die Erstellung eines Modells zur Ermittlung der optimalen Energieversorgungsstruktur bei einem vorgegebenen Endenergiebedarf. Die optimale Struktur der Energieversorgung wird dabei ermittelt unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen des Bedarfs und des Angebots einiger Primärenergieträger. Dies scheint mir besonders wichtig, um zu einer realistischen Beurteilung z.B. der Möglichkeiten der Wärme-Kraft-Kopplung oder der Sonnenenergienutzung zu kommen. Denn genau wie bei der Elektrizitätserzeugung ist auch für andere Energieträger die optimale Erzeugungsstruktur nicht zuletzt eine Funktion der Bedarfsschwankungen und der Speichermöglichkeiten.

Das Prinzip des verwendeten Ansatzes, d.h. die Zielfunktion des Optimierungsmodells lässt sich wie folgt darstellen:

$$\sum_i \sum_{k_j} \sum_{j_i} J_{i,k_j,j_i} \cdot C_{i,k_j,j_i} \text{ -----} \rightarrow \text{Min}$$

wobei J = Jahreskosten,
 C = Kapazität,
 i = Endenergieträger,
 k_j = Technologie,
 j_i = Auslastungsbereich

Die spezifischen Jahreskosten der Bereitstellung des Endenergieträgers i mit der Technologie k_j und einer Auslastung j_i multipliziert mit der entsprechenden installierten Kapazität der Technologie zur Bereitstellung des Endenergieträgers i , aufsummiert über alle Auslastungsbereiche, Energietechnologien und Endenergieträger i , sollen minimiert werden. Oder anders ausgedrückt: die Kosten für die Bereitstellung aller Endenergieträger sind zu minimieren. Dabei ist dann eine Reihe von Nebenbedingungen zu beachten, wie z.B.

- Deckung des Bedarfs
- Kapazitätsbeschränkung oder -vorgabe einer Technologie k_j
- Kopplungsproduktionsnebenbedingungen
- Beschränkung oder Vorgabe des Verbrauchs eines Primärenergieträgers
- und eine Reihe von Umweltrestriktionen.

Mit diesem Ansatz haben wir nun die optimale Deckung des Strom- und Fernwärmebedarfs für die Bundesrepublik Deutschland unter Berücksichtigung der Wärme-Kraft-Kopplung untersucht. Hierbei war insbesondere der jahreszeitliche Verlauf des Strom- und Fernwärmebedarfs zu berücksichtigen, da der Spitzenbedarf von Wärme und von Strom etwa zum selben Zeitpunkt im Winter auftritt. Den Rechnungen liegt ein Strombedarf von 1050 TWh und ein Fernwärmebedarf von 211×10^3 Tcal im Jahre 2000 zu Grunde.

Zur Konkurrenz waren verschiedene fossile und nukleare Heizkraft- und Kraftwerke zugelassen, wobei die Heizkraftwerke Strom und Wärme als Koppeiprodukte erzeugen.

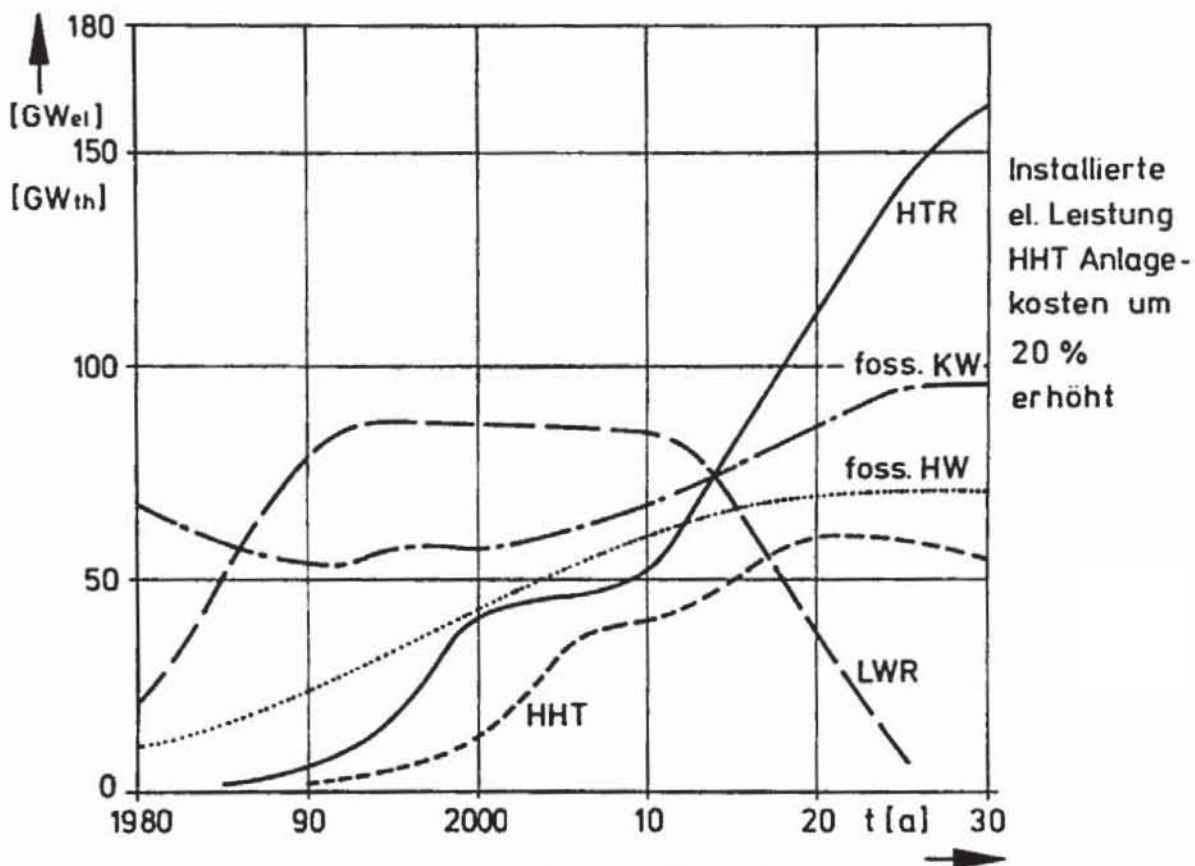


ABB. 11: ERGEBNISSE DES OPTIMIERUNGSMODELLS

Aufgetragen sind in Abb. 11 die installierten Kapazitäten der verschiedenen Heiz- und Kraftwerke bis zum Jahre 2030. Der Leichtwasserreaktor, der hier sowohl zur Strom- als auch zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird, wird im nächsten Jahrhundert durch den Hochtemperaturreaktor (HTR) und den Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine (HHT) abgeißt. Der letztere wird in diesem Fall wegen seiner guten Eigenschaften in bezug auf die Wärme-Kraft-Kopplung zugebaut, obwohl seine Anlagekosten hier mit 20% höher als beim HTR angenommen wurden. Der starke Zubau der fossilen Heizwerke dient im wesentlichen der Spitzenlastdeckung in der Wärmeversorgung.