

Energiemodelle – Entscheidungshilfen für die Energieplanung

Stefan Rath-Nagel, Alfred Voss*)

Schlagwörter: Energie, Systemforschung, Simulationsmodell

Übersicht: Die Probleme der Energieversorgung sind zunehmend komplexer und damit in ihrer wechselseitigen Beeinflussung unüberschaubarer geworden. Die Entwicklung von Energiemodellen hat das Ziel, adäquate Entscheidungshilfen für die Energieplanung bereitzustellen. Die Möglichkeiten und das Spektrum der Aussagemöglichkeiten von Energiemodellen werden an einem dynamischen Modell für die Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland erläutert.

0. Einleitung

Die Probleme der Energieversorgung haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend gewandelt. Exponentielles Wachstum des Energiebedarfs, begrenzte Reserven der fossilen Energieträger, vor allem des Erdöls und Erdgases, zunehmende Importabhängigkeit, lange Zeitkonstanten und große finanzielle Aufwendungen für die Entwicklung und Einführung neuer Energietechnologien sowie die zunehmende Belastung der Umwelt durch den Energieverbrauch sind einige der Schlüsselbegriffe, die diese veränderte Situation kennzeichnen. Sie machen aber auch gleichzeitig deutlich, daß die Energieversorgung nicht länger als ein isoliertes technisch-ökonomisches Problem angesehen werden kann. Die inneren Verzahnungen und die gegenseitige Abhängigkeiten der einzelnen im Zusammenhang mit der Energieversorgung auftretenden Probleme stellen neue Anforderungen an die Energieplanung, die sich mit dem Begriff der ganzheitlichen Betrachtungsweise umschreiben lassen. Hierunter ist der Versuch zu verstehen, komplexe Fragestellungen im Rahmen einer alle wichtigen Einflußgrößen erfassenden Gesamtanalyse zu betrachten. Übertragen auf die hier zur Diskussion stehenden Energieprobleme bedeutet dies, den Komplex Energie als ein in eine technisch-ökonomisch-ökologisch-gesellschaftliche Umgebung eingebettetes System zu betrachten, dessen Entwicklung wesentlich von seinen Wechselwirkungen mit dieser Umgebung bestimmt wird.

Mit der Systemforschung hat sich in der jüngsten Vergangenheit eine Wissenschaftsdisziplin entfaltet, deren allgemeines Ziel es ist, Methoden, Techniken und Strategien zur Lösung komplexer Probleme zu entwickeln. Dabei kommt insbesondere der Modelltechnik eine wichtige Rolle zu. Im folgenden soll nach einer kurzen Charakterisierung verschiedener methodischer Modellansätze ein Energiemodell für die Bundesrepublik Deutschland erläutert werden. Im Anschluß daran werden die mit Hilfe des Modells erzielten Ergebnisse diskutiert, um daran die Möglichkeiten und Grenzen von Energiemodellen als Entscheidungshilfe für die Energieplanung zu zeigen.

1. Methodische Ansätze für Energiemodelle

Jeder, der eine Entscheidung fällt, macht sich eine Vorstellung von ihren Wirkungen. Hierzu bedient er sich, bewußt oder unbewußt, einer Modellvorstellung, die ihm die Folgen seiner Entscheidung zeigen und ihre Beurteilung möglich

machen soll. Intuitive- oder Gedankenmodelle müssen aber da versagen, wo eine Vielzahl von Einflußgrößen, Funktionszusammenhänge und deren Verknüpfung zu berücksichtigen sind, um eine entscheidungsadäquate Abbildung der Wirklichkeit zu erreichen. Komplexe Probleme, wie die der Energieversorgung, erfordern deshalb die Aufstellung mathematischer Modelle. Formal bringen diese zwei Vorteile mit sich: einmal müssen alle Annahmen und Zusammenhänge mathematisch exakt formuliert werden, sie sind damit leichter überprüfbar sowie diskutierbar und zum anderen können Rechenanlagen benutzt werden. Die heute im Rahmen von Energiemodellen verwendeten methodischen Ansätze lassen sich in Optimierungs-, Simulations- und ökonomische Ansätze einteilen. Optimierungsmodelle minimieren oder maximieren eine Zielfunktion unter Beachtung einer Reihe von restriktiven Nebenbedingungen. Unter Simulation sind Modelle einzuordnen, welche die Entwicklung der Zeitreihen von Systemgrößen endogen erklären, in dem sie die Ursache-Wirkungszusammenhänge darstellen. Ökonometrische Ansätze ermitteln formelmäßig Beziehungen zwischen den Systemgrößen aus der Vergangenheit und schreiben sie für die Zukunft fort. Jeder dieser Ansätze hat spezifische Vor- und Nachteile, so daß man nicht von einer schlechthin „besten“ Methode sprechen kann. Die Ziele der Modellentwicklung sind dabei bestimmend für den zu verwendenden methodischen Ansatz und es erweist sich oft als sinnvoll durch eine Kombination verschiedener Methoden ihre spezifischen Vorteile zu nutzen.

2. Beschreibung des Energiemodells für die Bundesrepublik

Im folgenden soll der Aufbau und die Struktur eines Energiemodells, das zur Analyse der langfristigen Entwicklungsmöglichkeiten des Energiesystems für die Bundesrepublik Deutschland dient, erläutert werden. Dabei sollen insbesondere die Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umgebung, d.h. mit der gesamten Wirtschaft, der Gesellschaft und der Umwelt, berücksichtigt werden. Dieses allgemeine Ziel läßt sich in mehrere Teilziele aufgliedern:

1. Untersuchung der Struktureigenschaften und des dynamischen Verhaltens im Bereich Energienachfrage und Energieangebot.
2. Erforschung und Aufzeigen von Grenzsituation und kritischen Zuständen in der Energiebedarfsdeckung, wie Untersuchung der Auswirkungen einer Versorgungskrise.
3. Hinweise auf Folgen und Bewertung alternativer Energieversorgungsstrategien.
4. Untersuchung von Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten in der Entwicklung der Energiewirtschaft wie Veränderung des wirtschaftlichen Wachstums oder Einführung von Energiesparmaßnahmen.

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

*) Dipl.-Ing. St. Rath-Nagel und Dr.-Ing. A. Voss sind Mitarbeiter der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung der Kernforschungsanlage Jülich, Jülich.

Bild 1 zeigt die Grundstruktur des Energiemodells. Aus Gründen der Überschaubarkeit und der mathematischen Handhabung ist das gesamte Modell in acht Sektoren strukturiert, die im folgenden näher erläutert werden sollen. 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 Disaggregation¹⁾ der Wirtschaft in sechs Bereiche ausgeht. Es sind dies zunächst einmal vier industrielle Bereiche, nämlich

1. die Industrie der Steine und Erden,
2. die Eisenschaffende Industrie,
3. die Chemische Industrie und
4. die anderen Industriebereiche, die den Rest der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie sowie alle anderen Industriegruppen umfassen.

Darüber hinaus existiert der Bereich der Energiewirtschaft, der zusätzlich in sechs Untergruppen unterteilt wurde, und

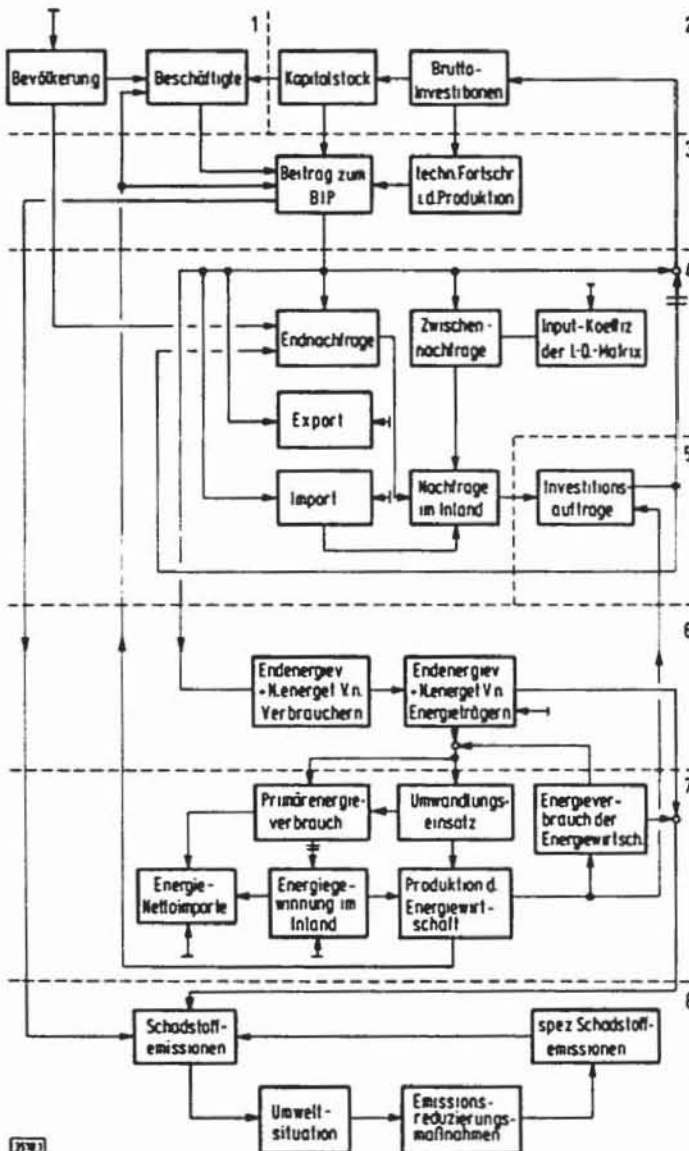


Bild 1. Grundstruktur des Energiemodells mit den Sektoren 1 bis 8.
 1 Endenergieverbrauch und nichtenergetischer Verbrauch nach Verbrauchern unterschieden
 2 Endenergieverbrauch und nichtenergetischer Verbrauch nach Energieträgern unterschieden

1) Aufgliederung

schließlich ein Bereich, zu dem alle anderen Unternehmen gerechnet werden, die weder der Industrie noch der Energiewirtschaft angehören. Dies sind Landwirtschaft, Industriebetriebe mit weniger als 10 Beschäftigten, Baugewerbe, Handel, Verkehr, Nachrichten, Dienstleistungen, Wohnungsvermietung und staatliche Bereiche.

Der Energieverbrauch wird im sechsten Sektor für die eben erwähnten vier Industriegruppen, für den Verkehr (getrennt nach Güter- und Personenverkehr und Verkehrsträgern), für den Bereich der Haushalte (getrennt nach Sammelheizung, Einzelheizung und übrigen Verbrauch) und für die Gruppe Kleinverbraucher festgelegt. Dabei werden beim derzeitigen Ausbauzustand des Modells sechs verschiedene Primär- und elf verschiedene Sekundärenergieträger betrachtet. Der Umweltsektor dient dazu, die Emissionen für acht Schadstoffe zu ermitteln.

Im Bevölkerungs- und Beschäftigungssektor 1 des Bildes 1 wird ausgehend von der Bevölkerungsentwicklung die Zahl der Beschäftigten in den produzierenden Bereichen durch einen Vergleich des Arbeitskräfteangebots, das aus der Bevölkerungszahl und vorgegebenen Erwerbsquoten ermittelt wird, mit der Arbeitskräftenachfrage der Unternehmen festgelegt. Die Arbeitskräftenachfrage ist dabei von den Produktionsbedingungen in den einzelnen Bereichen abhängig; sie läßt sich über die Kapitalintensität, d.h. die je Kapitaleinheit eingesetzten Arbeitskräfte bei Kenntnis des zugehörigen Kapitalstocks ermitteln.

Im Sektor 2 wird der Produktionsfaktor Kapital, gerechnet in realen Preisen (Preisbasis 1962), für die einzelnen Wirtschaftsbereiche bestimmt. Der Kapitalstock vermehrt sich dabei um die Bruttoinvestitionen und vermindert sich um die abnutzungsbedingten Abschreibungen, die im Bild aus Vereinfachungsgründen nicht aufgenommen wurden.

Beschäftigte und eingesetztes Produktionskapital sind Produktionsfaktoren (Sektor 3), durch deren Einsatz das Produktionsergebnis, gemessen als Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt (BIP), bestimmt wird. Als dritte den Produktionsoutput bestimmende Größe wirkt der technische Fortschritt, der aus Gründen einer möglichst geschlossenen Erklärung nicht exogen vorgegeben, sondern über eine Korrelation mit den kumulierten Bruttoinvestitionen bestimmt wird. Der Beitrag zum Bruttoinlandsprodukt bzw. die Nettoproduktion der einzelnen Bereiche wird über eine Produktionsfunktion vom Cobb-Douglas-Typ ermittelt.

Aufgabe des Sektors 4, des Nachfragesektors, ist die Ermittlung der End- und Zwischennachfrage nach Gütern und Dienstleistungen der einzelnen Wirtschaftsbereiche. Die Endnachfrage besteht aus vier Komponenten, der Nachfrage für

1. den privaten Verbrauch,
2. den öffentlichen Verbrauch,
3. die Investitionsgüternachfrage und
4. Nachfrage der übrigen Welt (Exportnachfrage).

Die einzelnen Komponenten der Endnachfrage werden dabei im Falle des privaten und öffentlichen Verbrauchs indirekt aus dem Bruttoinlandsprodukt und für den Export über vorgegebene Exportquoten ermittelt.

Die Investitionsgüternachfrage wird im Sektor 5 determiniert, der nachfolgend näher beschrieben wird. Die für die Befriedigung der Endnachfrage notwendigen Vorleistungen der einzelnen Wirtschaftsbereiche, also die Zwischennachfrage der Produktionsbereiche, wird mit einer auf die sechs Wirtschaftsbereiche aggregierten Input-Output (I-O)-Matrix berechnet.

Ist die Nachfrage berechnet, so lassen sich die Investitionsentscheidungen der Unternehmen aufgrund einer auf der vergangenen Entwicklung aufbauenden Nachfrageeinschätzung festlegen, wenn man von anderen das Investitionsverhalten beeinflussenden Faktoren absieht. Die Investitions-

aufträge werden also durch die für die Deckung einer bestimmten erwarteten Nachfrage erforderliche Veränderung des Kapitalstocks ermittelt. Die so bestimmten 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 Bruttoinlandsprodukt (BIP) und die Nachfrage wieder zu den Investitionsaufträgen führt.

Im Sektor 6 werden die in der Industrie, in den Haushalten, bei den Kleinverbrauchern und im Verkehr verbrauchten Energiemengen berechnet. Dabei wird für die vier industriellen Bereiche nach dem energetischen und nichtenergetischen 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 und die mit den kumulierten Investitionen korrelierten spezifischen Energieverbräuche verwendet. Der Energieverbrauch der Haushalte, der Kleinverbraucher und des Verkehrs wird durch aus der wirtschaftlichen Entwicklung abgeleitete Größen, d.h. durch das verfügbare Einkommen, den Wohnungsbestand und das Verkehrsaufkommen im Personen- und Güterverkehr erklärt. Der so berechnete Endenergieverbrauch wird anschließend durch Strukturkoeffizienten auf die angebotenen Endenergieträger aufgeteilt.

Die wesentliche Aufgabe des Energieversorgungssektors 7 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, Erdgas, Heizöl, Wasserkraft oder Kernenergie und der andere Teil der Endenergie wird von den nicht umgewandelten Primärenergieträgern gestellt, dies ist z.B. der Fall bei der direkten Nutzung des Erdgases zur Raumheizung. Außerdem ist hierbei noch der Energieverbrauch der Energiewirtschaft, also die Energie, die in den verschiedenen Stufen der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Energie selbst verbraucht wird, zu berücksichtigen. Mit Hilfe von vorgegebenen Importanteilen und Produktionsgrenzen für die inländische Produktion läßt sich der gesamte Primärenergiebedarf in die Komponenten Energieimporte und Energiegewinnung im Inland aufteilen. Zusammen mit dem Umwandlungseinsatz und dem Aufwand für die Energieverteilung kann somit die Produktion in allen Teilbereichen der Energiewirtschaft (Gewinnung, Umwandlung und Verteilung) angegeben werden. Sie erfordert ebenso wie die Produktion in den anderen Wirtschaftsbereichen den Einsatz von Beschäftigten, von Kapital und die Bereitstellung von Vorleistungen zur Befriedigung der Zwischennachfrage der Energiewirtschaft. Andererseits trägt auch die Energiewirtschaft zur Einkommensschaffung und zum Bruttoinlandsprodukt 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 im Umweltsektor 8 des Bildes 1 über spezifische Emissionsfaktoren die Freisetzungsmengen der wichtigsten Schadstoffe bestimmt. Gegenüber Ansätzen, welche die Umweltschutzmaßnahmen als Funktion der Zeit vorgeben, ist in diesem Modell versucht worden, die Emissionsreduzierungs-

maßnahmen, d.h. die Entwicklung der spezifischen Emissionsfaktoren unter Einbeziehung gesellschaftlicher und interessenspolitischer Verhaltensmechanismen zu simulieren. Grundsätzlich wird dabei wie folgt vorgegangen. Die verschiedenen Schadstoffemissionen sind die bestimmenden Größen der Umweltsituation bzw. der Umweltbelastung. Das Bewußtwerden einer nicht tragbaren oder nicht gewünschten Umweltsituation würde, unter der Hypothese der Existenz eines Umweltschadens- und Bewußtseins-Regelkreises, nach einiger Zeit zur Verordnung von Emissionsreduzierungsmaßnahmen oder was vergleichbar damit ist, zur Aufstellung von Umweltstandards führen, die wiederum die spezifischen Emissionsfaktoren herabsetzen.

Diese Ausführungen sollen zur Erklärung der Grundstruktur ausreichen; die einzelnen Sektoren des Modells sind strukturell weiter aufgegliedert und enthalten eine Vielzahl von Funktionszusammenhängen, die hier nicht im einzelnen erläutert werden können. Faßt man die vorstehenden Ausführungen zusammen, so läßt sich der erarbeitete Modellansatz wie folgt kennzeichnen:

1. Es handelt sich um ein quasi-geschlossenes dynamisches Simulationsmodell aus einem System gekoppelter Differentialgleichungen.
2. Die wirtschaftliche Entwicklung wird für sechs Wirtschaftsbereiche durch eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion mit einer endogenen Erklärung für die Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital und technischer Fortschritt beschrieben. Die Investitionen werden aus der Nachfrageentwicklung der Vergangenheit abgeleitet, wobei die Nachfrage auch die über eine intersektorale Vorleistungsverflechtung ermittelte Zwischennachfrage enthält.
3. Der Energieverbrauch wird für die einzelnen Verbrauchsgruppen durch aus der wirtschaftlichen Entwicklung abgeleitete Faktoren, d.h. Produktionsziffern, Einkommen, Wohnungsbestand, Verkehrsaufkommen berechnet.
4. Die Energieversorgung wird mit Hilfe eines detaillierten Energieflußmodells dargestellt.
5. Der Umweltsektor beschreibt dynamisch die Einführung von Umweltschutzmaßnahmen.
6. Die Simulation alternativer Strategien oder Szenarien und das Aufzeigen ihrer Auswirkungen erfolgt durch Parametervariation.

3. Ergebnisse einiger Strategierechnungen

Im folgenden sollen nun einige Ergebnisse, die mit dem beschriebenen Modell erzielt wurden, mitgeteilt werden. Im Bild 2 ist für den sogenannten Referenz- oder Standardfall

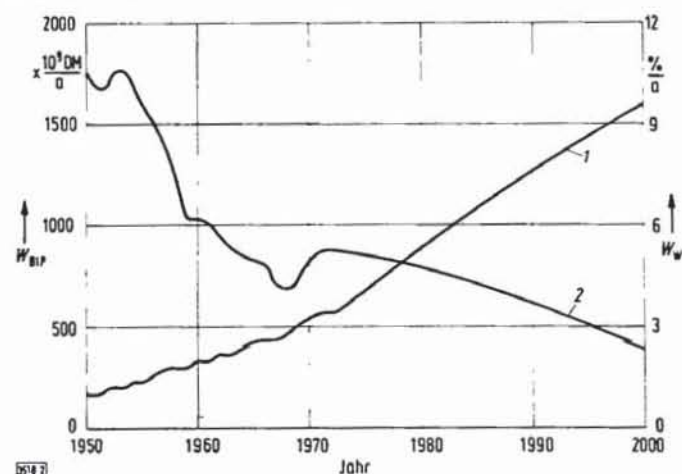


Bild 2. Standardfall einer wirtschaftlichen Entwicklung
1 Bruttoinlandsprodukt 2 durchschnittliches wirtschaftliches Wachstum

die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts W_{BIP} und die Veränderung des Wirtschaftswachstums W_w bis zum Jahre 2000 dargestellt.

Die Ergebnisse dieses Referenzfalls sind in keiner Weise gegenüber den Ergebnissen 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 zugrunde:

Es wird eine möglichst gleichmäßige und stabile Entwicklung innerhalb der gesamten Volkswirtschaft angestrebt. Dazu wird eine kontinuierliche, ungestörte Energieversorgung vorausgesetzt. Unterstellt wird weiter, daß es aufgrund der Produktivitätsbedingungen, trotz einer am Rückgang der Erwerbsquoten und der Bevölkerungszahlen sichtbaren Verringerung des Arbeitskräfteangebotes, durch vermehrten technischen Fortschritt gelingen wird, bis zum Jahre 2000 im Durchschnitt ein stetiges, allerdings abnehmendes Wirtschaftswachstum beizubehalten. Das Bruttoinlandsprodukt würde unter dieser Hypothese von $W_{BIP} \approx 700 \cdot 10^9$ DM im Jahr 1974 auf rd. $1600 \cdot 10^9$ DM im Jahre 2000 (in Preisen von 1962) ansteigen, jedoch mit einer im selben Zeitraum von durchschnittlich 4,5 % auf 2,5 % verringerten Wachstumsrate.

Bild 3 zeigt den dieser wirtschaftlichen Entwicklung entsprechenden Verbrauch an Primärenergie. Bei der hier zugrundegelegten kontinuierlichen, ungestörten Entwicklung der Energieversorgung wurde unterstellt, daß aus Gründen der längerfristigen Stabilisierung des Energiemarktes ein relativer Rückgang des Erdölanteils zu Gunsten anderer Energieträger angestrebt wird, wie es tendenzmäßig der Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung entspricht. Dabei steht die forcierte Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung im Vordergrund. Neue Energietechnologien, wie die Kohlevergasung, die nukleare Fernenergie oder die Nutzung der Wind- oder Sonnenenergie, sind dabei noch nicht berücksichtigt worden. Der Primärenergieverbrauch steigt unter den für den Standardfall geltenden Prämissen auf fast 6500 TWh (= $800 \cdot 10^6$ t SKE²⁾ im Jahre 2000 an, er wächst also mit 3% jährlich. Im Jahre 2000 werden dabei 38 % des gesamten Primärenergiebedarfs durch Kernenergie gedeckt, während der Verbrauch von Stein- bzw. Braunkohle nahezu auf der heutigen Höhe von 820 TWh stagniert und der Anteil des Erdöls von 55 % auf 30 % zurückgeht. Der Anteil der importierten Fertigprodukte bei Mineralöl dürfte, wenn die derzeit geltenden Importstrukturen für Mineralöl beibehalten werden, auf rund 325 TWh im Jahre 2000 ansteigen. Der Erdgasanteil hingegen würde sich nach dem Durchlaufen eines Maximums zwischen 1985 und 1990 bis zum Jahre 2000 allmählich wieder verringern, auf rund 650 TWh, da unterstellt wurde, daß eine nennenswerte Vergrößerung des Liefervolumens über das für die Mitte der 80-er Jahre bekannte Maß hinaus aus Ressourcen-Erschöpfungsgründen nicht möglich sein dürfte. Der Einsatzanteil der Wasserkraft und des Importstroms dürfte sich nicht wesentlich verändern.

Die aus einer derartigen Entwicklung des Primärenergieverbrauchs resultierenden Folgen für die Umwelt zeigt Bild 4 anhand der Zu- bzw. Abnahme der wichtigsten fossilen und radioaktiven Schadstoffemissionen. Aufgrund verstärkter Maßnahmen zur Verringerung der Umweltbelastung und durch die weniger starke Zunahme des Verbrauchs an fossilen Energieträgern, der in den neunziger Jahren sogar absolut rückläufig ist, durchlaufen die mit der Verbrennung fossiler Energieträger verbundenen Schadstoffemissionen m_{Sch} in den achtziger Jahren ihren Maximalwert. Die radioaktiven Emissionen A nehmen dagegen aufgrund des stark

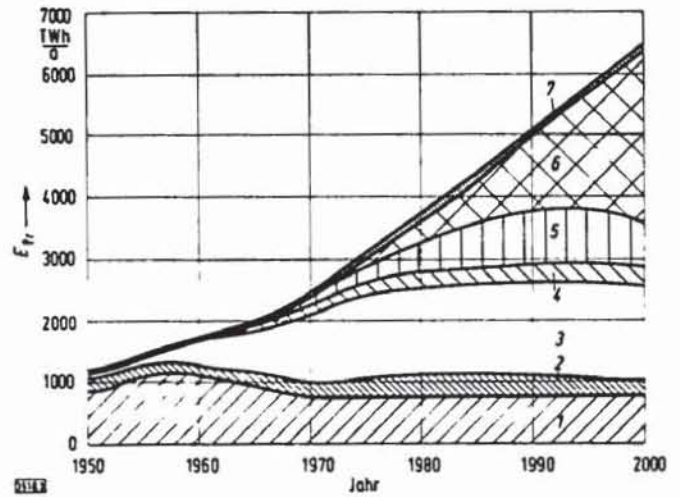


Bild 3. Standardfall einer Entwicklung des Primärenergieverbrauchs E_{Pr} .
 1 Steinkohle 3 Erdöl, roh 5 Gas
 2 Braunkohle 4 Mineralölprodukte 6 Kernenergie
 7 Wasserkraft und Importstrom

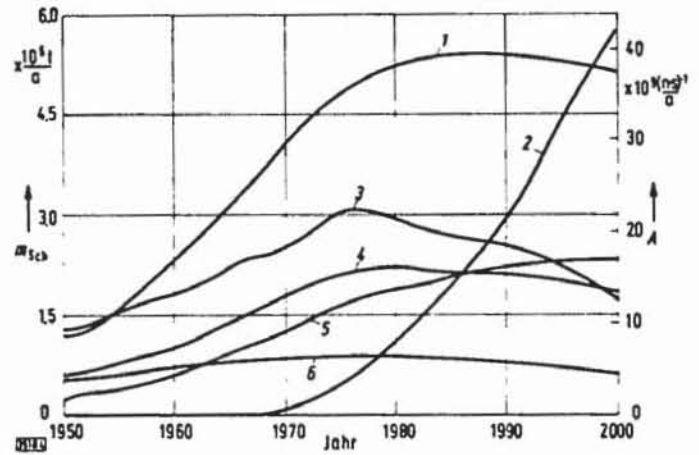


Bild 4. Standardfall einer Schadstoffemission mit m_{Sch} den Schadstoffmengen und A der gesamten radioaktiven Emission.
 1 Kohlenmonoxyd 2 Radioaktivität
 3 Schwefeldioxid 4 Stickoxid
 5 Kohlenwasserstoff 6 Staub

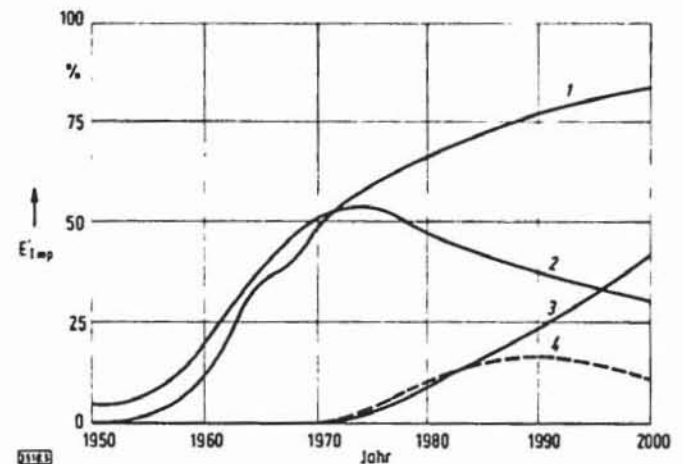


Bild 5. Standardfall der Entwicklung der Importabhängigkeit E_{Imp} .
 1 insgesamt 3 Kernenergie
 2 Mineralöl 4 Gas

2) 1 kg SKE \approx 8,14 kWh

steigenden Einsatzes der Kernenergie bis zum Jahre 2000 stetig zu. Dabei wurde hier mit den, den heutigen Erfordernissen der Rückhaltetechnik entsprechenden Emissionsfaktoren für den Reaktor und die Wiederaufarbeitungsanlage gerechnet, d.h. es wurden keine zusätzlichen Rückhaltemaßnahmen eingeführt.

Der mit der im Bild 3 gezeigten Entwicklung verbundene Strukturwandel in der Energieversorgung führt zu einer Veränderung in der Abhängigkeit von Energieimporten, wie sie im Bild 5 dargestellt ist. Die Importabhängigkeit E_{Imp} nimmt bis zum Jahre 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 im Jahre 1975.

Die Importabhängigkeit von Erdgas und Mineralöl – Energieträgern, die überwiegend aus politisch instabilen Regionen bezogen werden – nimmt bei dem in dieser Rechnung angenommenen Strukturwandel allmählich ab, während die Einfuhrabhängigkeit von Kernenergie im gleichen Zeitraum stark zunimmt. Kernbrennstoffe sind jedoch aufgrund ihres hohen Energieinhaltes und der daraus resultierenden günstigeren Reservehaltung und wegen der globaleren Verteilung der Uran- und Thoriumvorräte über politisch ziemlich stabile Gebiete vom Standpunkt der Versorgungssicherheit den fossilen Energieträgern weitaus vorzuziehen.

Der positive Effekt dieses Strukturwandels in der Energieversorgung wird auch deutlich, wenn man die für die großen Energieeinfuhren erforderlichen Einfuhrwerte, denen ein entsprechend großer Devisenabfluß gegenübersteht, betrachtet. Im Bild 6 ist die Entwicklung der Einfuhrkosten K_E für Erdöl, Mineralölprodukte, Erdgas und Kernenergie für eine bestimmte Preishypothese bis zum Jahre 2000 dargestellt. Natürlich kann über die zukünftige Preisentwicklung keine eindeutige und sicher begründbare Aussage gemacht werden, daher wurde hier nur ein Modellfall von mehreren möglichen betrachtet; bei den für den Standardfall geltenden Annahmen würde sich der Devisenaufwand, selbst wenn man optimistischerweise unterstellt, daß die Preise für Erdöl, Mineralölprodukte und Erdgas auf dem Weltmarkt nicht weiter steigen würden, also auf der Preisbasis des Jahres 1974 konstant bleiben würden, bis zum Jahre 2000 auf durchschnittlich $40 \cdot 10^9$ DM jährlich belaufen. Für die Kernenergie hingegen würden die Ausgaben unter denselben Prämissen lediglich auf etwa $1 \cdot 10^9$ DM im Jahre 2000 ansteigen. Allein unter dem Aspekt der Devisensparnis wäre daher sicher eine noch weiter beschleunigte Einführung der Kernenergie zu begründen.

Die Ergebnisse des Standardlaufs zeigen, welche Art von Ergebnissen mit dem Modell zu erzielen sind und welche Fragestellungen zu beantworten sind.

Man kann die Fragenkomplexe in drei Gruppen einteilen:

1. In Fragen zur wirtschaftlichen Entwicklung und der sich daraus ergebenden Konsequenzen für den Energieverbrauch.
2. In Fragen zur Deckung des Energiebedarfs durch alternative Energieumwandlungs- und Energienutzungstechnologien.
3. In Fragen zur Schadstoffbelastung durch den Energieverbrauch.

Aus diesen drei Fragekomplexen sind bereits eine Reihe von Fragestellungen – wie die Auswirkungen eines veränderten wirtschaftlichen Wachstums, die Einführung von Energieeinsparmaßnahmen, die Einführung neuer Energietechnologien und die Auswirkungen eines verzögerten Kernereinsatzes – untersucht worden, deren Ergebnisse hier nicht näher erläutert werden können (siehe dazu [1]). Neben diesen

mehr längerfristigen Fragestellungen sollen nun einige Modellrechnungen erläutert werden, die sich mit der Ermittlung der Folgen von plötzlich auftretenden Versorgungsstörungen befassen. Es handelt sich dabei um die Beantwortung von Fragestellungen der folgenden Art:

1. Welche volkswirtschaftlichen Auswirkungen hat eine Störung der Energieversorgung?
2. Welche Maßnahmen können im Falle einer Versorgungskrise den wirtschaftlichen Schaden möglichst gering halten?

Bild 7 zeigt als Beispiel die Auswirkungen einer im Jahre 1980 plötzlich auftretenden 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 1/3 verringert. Da kein Ersatz aus anderen Ländern geliefert wird, ist das Mineralölangebot auf dem Inlandsmarkt um 1/3 kleiner als die Nachfrage. Während einer kurzen Übergangszeit, die durch das Aufbrauchen der Lager bei Verbrauchern, Händlern und Raffinerien gekennzeichnet ist, (etwa 100 Tage) werden administrative Verbrauchsbeschränkungen erlassen. Der Mineralölabsatz an private Haushalte, Kleinverbraucher und Industrie wird um rund 40% redu-

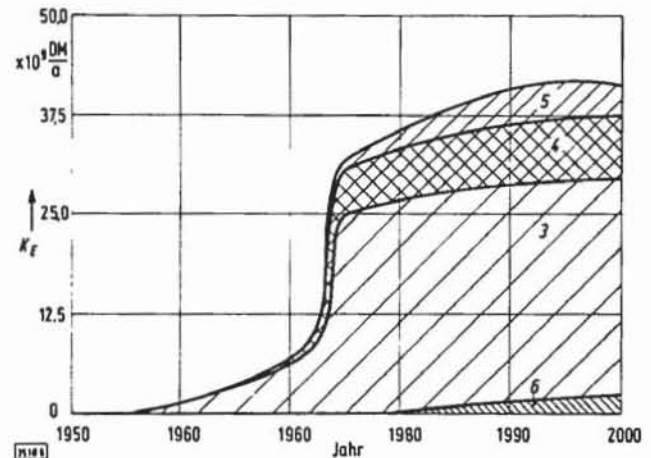


Bild 6. Entwicklung der Einfuhrwerte K_E für Energie (in jeweiligen Preisen, ab 1974 konstante Preisbasis angenommen). Vgl. Legende zu Bild 3.

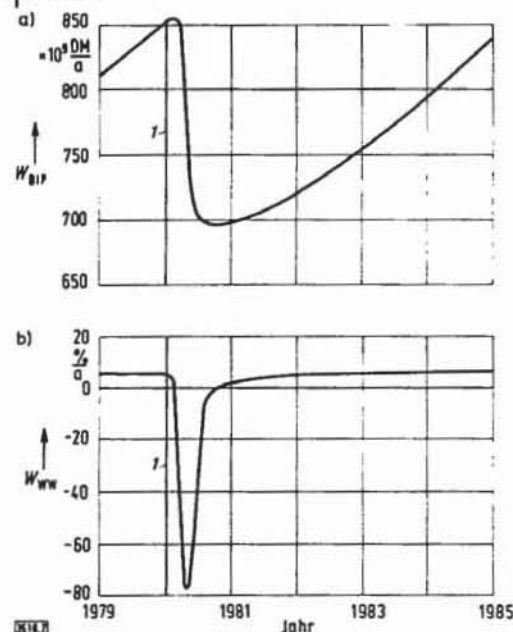


Bild 7. Einfluß einer Versorgungskrise.
a) Bruttoinlandsprodukt W_{BIP} ,
b) wirtschaftliches Wachstum W_{WW} .
1 Beginn der Störung

ziert. Die Verkehrsleistung im Individualverkehr wird um 30 %, im öffentlichen Personenverkehr um 10 % verringert. Im Güterverkehrsbereich und in der Energiewirtschaft werden keinerlei Beschränkungen eingeführt.

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 zurückgenommen wird, d.h. daß die Produktion selbst verringert wird.

In allen Verbrauchssektoren laufen gleichzeitig Prozesse für den Austausch des Öls an. Es wird dabei angenommen, daß sich die durchschnittliche Übergangszeit infolge der Krisensituation extrem verringert. Die Auswirkungen der Krise verursachen wegen der erforderlichen Einschränkungen einen Produktionsrückgang und führen zu einer starken Rezession des Bruttoinlandsproduktes. Selbst sofort einsetzende Übergangsmaßnahmen können das wirtschaftliche Wachstum erst ein Jahr später stabilisieren. Das Bruttoinlandsprodukt ist innerhalb eines Jahres von rd. $850 \cdot 10^9$ DM auf $700 \cdot 10^9$ DM zurückgefallen (auch hier wieder in Preisen von 1962 gerechnet); 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 auf etwa $825 \cdot 10^9$ DM belaufen (ermittelt in Preisen von 1962).

4. Schlußbemerkung

Mit der Beschreibung des hier vorgestellten Energiemodells und der Erläuterung einiger mit seiner Hilfe erzielten Ergebnisse, sollte über den speziellen Fall hinaus, ein Eindruck von den Möglichkeiten und Grenzen solcher Modellentwicklungen für die Energieplanung vermittelt werden. Abschließend erscheint aber noch folgende Anmerkung notwendig. Ein Modell ist immer nur ein vereinfachter Ausschnitt der Wirklichkeit, der so gewählt wurde, daß die Vereinfachungen im Rahmen der Zielsetzungen vertretbar sind. Es gibt deshalb kein „Supermodell“, das Antworten auf alle Fragen ermöglicht. Die Entwicklung von Energiemodellen steht heute erst am Anfang, aber es scheint sicher, daß die Aussagemöglichkeiten, die Aussagequalitäten und damit der Nutzen der Modellentwicklung mit zunehmender Erfahrung größer werden wird.

5. Schrifttum

- [1] St. Rath-Nagel: Alternative Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft in der BRD – Untersuchung mit Hilfe eines Simulationsmodells. Diss. RWTH Aachen 1975.
- [2] A. Voss: Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch–Energie–Umwelt. Jul-982-RG, Juli 1973.
- [3] F. Niehaus: Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energieerzeugung: CO₂ und H². Jul-1165-SE.

Manuskripteingang 1975–03–21