

DK 620.9 : 621.311

Anwendung systemtechnischer Methoden zur Analyse integrierter Energieversorgungs- Systeme

Von Dr.-Ing. A. Voss, Aachen

1. Energie und Systemtechnik

Die moderne Industriegesellschaft kann mit einer komplizierten Maschine verglichen werden, die qualitative hochwertige Energie in Abfallwärme umwandelt, um dadurch Nutzenergie für die Produktion einer enormen Vielfalt von Gütern und Dienstleistungen sowie zum unmittelbaren Verbrauch zur Verfügung zu stellen. Bis in die jüngste Vergangenheit ist aber die Bereitstellung, die Umwandlung, der Transport und die Verteilung von Energie überwiegend als ein isoliertes technisch-ökonomisches Problem behandelt worden, für das es "optimale" Lösungen zu finden galt. Um bei dem Vergleich mit der komplizierten Maschine zu bleiben, so hat man versucht, einige wichtige Teile, z.B. die Energieumwandlungstechniken zu optimieren. Die Summe einzelner Teiloptima ergibt aber keineswegs das Gesamtoptimum. Daß dennoch diese Vorgehensweise in der Vergangenheit erfolgreich war, lag begründet in dem Vorhandensein ausreichender Ressourcen, das der technologischen Entwicklung keine Grenzen setzte. Das exponentielle Wachstum des Energieverbrauchs hat heute aber einen Punkt erreicht, wo eine weitere Steigerung des Energiekonsums nicht ohne negative Auswirkungen auf andere Bereiche bleibt. Umweltbelastung, Verknappung der Reserven, Versorgungssicherheit, Verfügbarkeit, Raumordnung und Energieeinsparung sind einige der Schlüsselbegriffe, die die sich ändernden Probleme der Energieversorgung umschreiben. Die Energieversorgung kann nicht länger als ein isoliertes technisch-ökonomisches Problem angesehen werden, sondern sie muß verstanden werden als ein in eine technisch-ökonomisch-ökologisch-gesellschaftliche Umgebung eingebettetes System,

dessen Entwicklung wesentlich von seinen Wechselwirkungen mit dieser Umgebung bestimmt wird. Bild 1 versucht dies darzustellen.

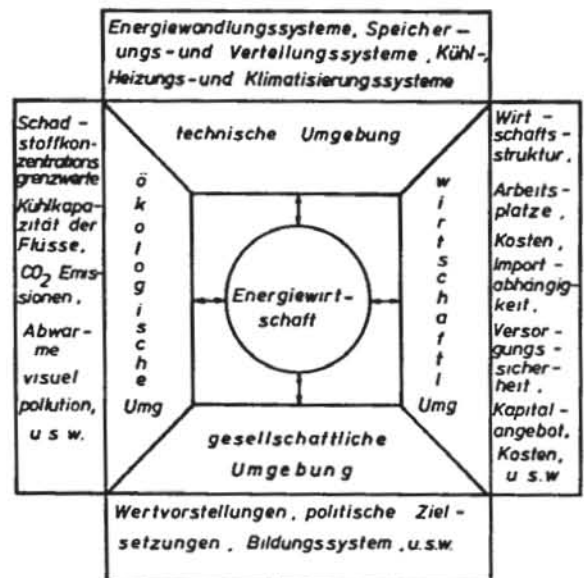


Bild 1. Einbettung der Energiewirtschaft

Die Berücksichtigung der Einbettung oder Integration der Energie in ihre Umgebung bei der Planung zukünftiger Energieversorgungssysteme ist die generelle Forderung, die sich aus dieser ganzheitlichen Problembetrachtung ableitet. Natürlich muß diese Integration auf verschiedenen Ebenen, z.B. der lokalen, der regionalen und der gesamtwirtschaftlichen Ebene, erfolgen und unterliegt demgemäß verschiedenen spezifischen Anforderungen und Randbedingungen. Gemeinsam aber ist allen diesen Integrationsbedingungen, daß zu ihrer Verwirklichung die in der Vergangenheit vorherrschenden auf einer isolierenden Betrachtungsweise aufbauenden Analyse- und Planungsmethoden nicht mehr ausreichen werden. Die neuen komplexen Problemstellungen erfordern adäquate Lösungsmethoden. Mit der Systemforschung hat nun in der jüngsten Vergangenheit eine Forschungsdisziplin an Bedeutung gewonnen, deren Ziel es ist,

Methoden, Techniken und Strategien zur Lösung komplexer Probleme zu entwickeln. Wegen des häufigen synonymen Gebrauchs der Begriffe Systemforschung, Systemtechnik und Systemanalyse sollen ihre Inhalte hier kurz definiert werden. Unter Systemforschung sind die auf die Gewinnung grundsätzlicher Erkenntnisse über die Struktur und das Verhalten komplexer Systeme sowie auf die Entwicklung neuer Methoden ausgerichteten Tätigkeiten zu verstehen, während die Systemtechnik die praktische Anwendung dieser Methoden und Erkenntnisse darstellt. Die Systemanalyse dagegen ist ein wichtiger Teil einer systemtechnischen Untersuchung. In diesem Zusammenhang scheint es noch wichtig darauf hinzuweisen, daß eine systemtechnische Untersuchung nicht die bloße Anwendung systemtechnischer Methoden darstellt, sie ist vielmehr zu verstehen als eine Strategie, durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise unter Verwendung der geeigneten systemtechnischen Methoden Problemlösungen aufzuzeigen.

Zwei Schlagworte tauchen im Zusammenhang mit systemtechnischen Untersuchungen zu Problemen der Energieversorgung immer wieder auf. Das eine ist das des "energy modelling". Hierunter ist die Erstellung von operationalisierbaren Modellen zur Abbildung der komplexen Problemstruktur zu verstehen, meist mit Hilfe einer elektronischen Rechenanlage. Die Bildung mathematischer Modelle bringt zwei Vorteile mit sich, einmal ist sie nicht gebunden an die limitierte Speicherfähigkeit des mensch-

lichen Denksystems, zum anderen sind wegen der mathematischen Formulierung alle Annahmen und Zusammenhänge überprüfbar. Das andere Schlagwort ist das der Bewertung. Die notwendige Berücksichtigung nichtökonomischer Einflußgrößen z.B. der Umweltbelastung, im Rahmen einer vergleichenden Betrachtung verschiedener Energieversorgungssysteme erfordert eine Bewertung der einzelnen nicht ohne weiteres vergleichbaren Größen. Hier müssen also im Prinzip Äpfel und Birnen verglichen werden, was die Schwierigkeiten kennzeichnet, gleichzeitig aber auch auf die Bedeutung der Verwendung eines adäquaten Bewertungsverfahrens hinweist.

2. Anwendung systemtechnischer Methoden bei der Energieplanung

2.1 Kraftwerksausbauplanung

Im folgenden Fall soll anhand von zwei Beispielen die Anwendung systemtechnischer Methoden für die Planung der zukünftigen Energieversorgung untersucht werden.

Im ersten Beispiel wird die Frage der Bedeutung des Hochtemperaturreaktors für die Energiewirtschaft der BRD untersucht. Die Entwicklung neuer Kraftwerkskonzepte mit den dazu notwendigen enormen öffentlichen Forschungsförderungsmitteln scheint erst dann gerechtfertigt, wenn diesen Kraftwerken für die Sicherung der zukünftigen Energieversorgung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte eine tragende Bedeutung zukommt.

In Bild 2 sind die Energiewandlungsmöglichkeiten des Hochtemperaturreaktors dar-

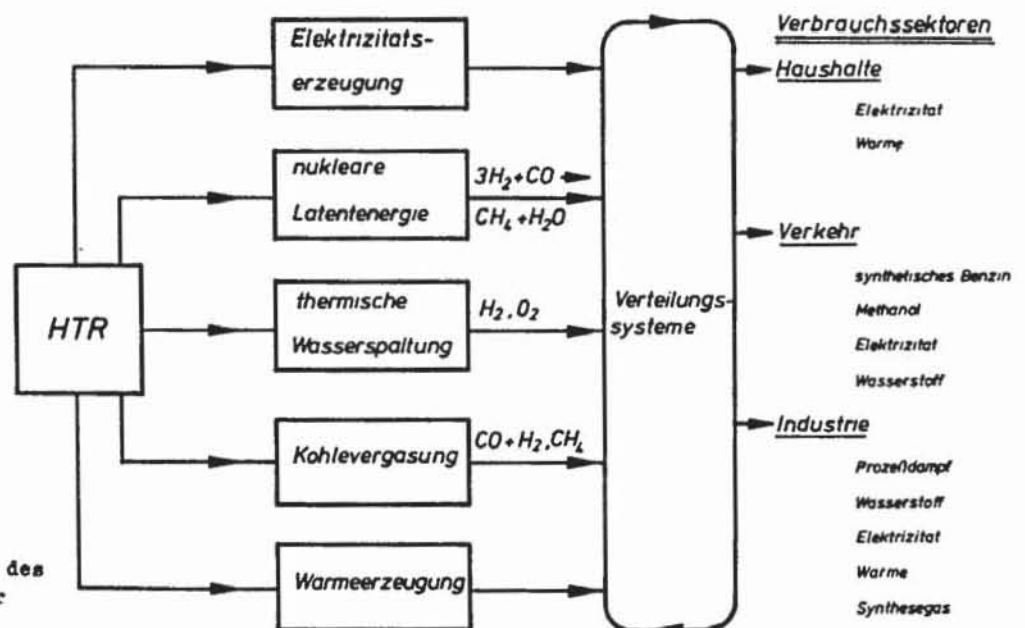


Bild 2. Einsatzmöglichkeiten des Hochtemperaturreaktors in der Energiewirtschaft

gestellt. Wegen seines hohen erreichbaren Temperaturniveaus (900-1000°C), kann der HTR außer zur Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung auch zur Vergasung von Kohle, zur thermischen Wasserspaltung und zur Erzeugung von Latentenergie eingesetzt werden. Er ist somit prinzipiell in der Lage, nahezu den gesamten Energiebedarf abzudecken. Inwieweit dies aber auch aus ökonomischen und ökologischen Gründen sinnvoll ist, ergibt sich erst aus einem Vergleich mit den anderen konkurrierenden Energietechnologien.

In Angriff genommen wurden zunächst die Frage nach der Integration des HTR's in die Elektrizitätsversorgung der BRD. Wegen der recht komplexen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Kraftwerkstypen in einem elektrischen Verbundsystem, können Auswahlkriterien nicht allein aus einer isolierten Beurteilung einzelner Kraftwerkstypen gewonnen werden. Die Struktur der Elektrizitätsversorgungsnetze, die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Energienachfrage, die Finanzierungsmöglichkeiten, u.s.w. sind weitere Kriterien die entscheidenden Einfluß im Rahmen der Zubauentscheidung haben. Deshalb ist die Frage der Integration des HTR's in die Elektrizitätsversorgung nur zu beantworten mittels einer Untersuchung über den "optimalen" Ausbau der gesamten Elektrizitätsversorgung der BRD.

Die komplexen Zusammenhänge und die Vielzahl der Faktoren, die bei einer Ausbauplanung zu berücksichtigen sind, machen sie zur komplizierten und rechenintensiven Prozedur, die die Entwicklung eines formalisierten Rechenmodells nützlich erscheinen läßt. Mit dem Modell sollten die Gegebenheiten der Praxis möglichst genau simuliert werden können. Das Modell sollte außerdem so angelegt sein, daß es neben der Ermittlung der den Netzlastkurven entsprechenden optimalen Kapazitätsverteilung der verschiedenen Kraftwerkstypen auch Aussagen liefern kann über die benötigten Brennstoffmengen, die notwendige Anreicherungs- und Wiederaufarbeitungskapazität und die erforderliche Fertigungskapazität der Kraftwerksbauenden Industrie.

Zur Lösung dieser Problemstellung wurde ein Rechenmodell [1], [2] entwickelt, das die op-

timale Kapazitätsverteilung mit der Hilfe eines linearen Programmierungsansatzes (lineare Optimierung) ermittelt. Als Eingangsparemeter werden die spezifischen Kraftwerksdaten, die allgemeinen Kostendaten, die charakteristischen Daten des Netzes und der zu befriedigende zukünftige Elektrizitätsbedarf benutzt.

Nach der Berechnung der lastabhängigen Stromerzeugungskosten aller Kraftwerkstypen wird der optimale Ausbau des Kraftwerkssystems so ermittelt, daß die Stromerzeugungskosten des Gesamtsystems minimiert werden. Diese Optimierung erfolgt unter der Beachtung einer Reihe von Nebenbedingungen, wie z.B. der Verfügbarkeit von erbrütetem Material und den Anforderungen der jahreszeitlichen Nachfrageschwankungen. Anschließend an diese Optimierungsrechnung werden dann der Brennstoffbedarf, der Trennarbeitsbedarf und die anderen Anforderungen an den Brennstoffkreislauf ermittelt.

Bild 3 zeigt die typischen Ergebnisse einer Modellrechnung für die BRD. Die Anlage des Modells erlaubt die Untersuchung nahezu aller denkbaren Kraftwerksstrategien. Die Aussagekraft der Ergebnisse kann mit einer Sensitivitätsanalyse, d.h. durch die Variation einzelner Parameter entsprechend ihrem Unsicherheitsbereich zusätzlich abgesichert werden. Die Erweiterung dieses

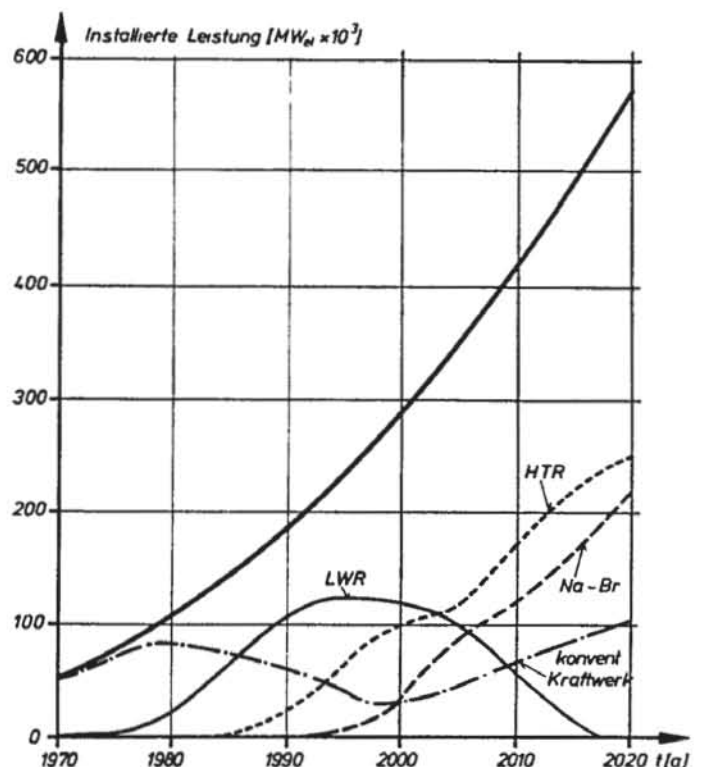


Bild 3. Kraftwerksstrategieplanung

Rechenmodells zur Erfassung, auch des nicht elektrischen Energiebedarfs ist zur Zeit in Arbeit.

2.2 Simulationsmodell Mensch-Energie-Umwelt

Das zweite Beispiel erläutert die Anwendung der Methode der kybernetischen Simulation an einem anderen Problem aus dem Energiebereich. Diese Methode ist besonders geeignet, die Struktur und das Verhalten komplexer Systeme unter besonderer Berücksichtigung ihrer Rückkopplungsstruktur zu analysieren und zu simulieren. Die in Rückkopplungs-Systemen bestehenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen der miteinander vermaschten Regelkreise werden dabei als gekoppelte Differentialgleichungen dargestellt, die auf dem Rechner approximativ als Differenzgleichungen gelöst werden.

Als Beispiel für die Erläuterung dieser Methode wird eine Untersuchung gewählt, die sich mit den langfristigen globalen Aspekten der Energieversorgung beschäftigt. [3] Ziel der Untersuchung war es, mittels eines ganzheitlichen Ansatzes die Folgen alternativer Strategien für die zukünftige Energieversorgung aufzuzeigen. In Bild 4 ist die Grundstruktur des verwendeten Modellansatzes skizziert. Dargestellt sind die beiden Determinanten des Energiebedarfs,

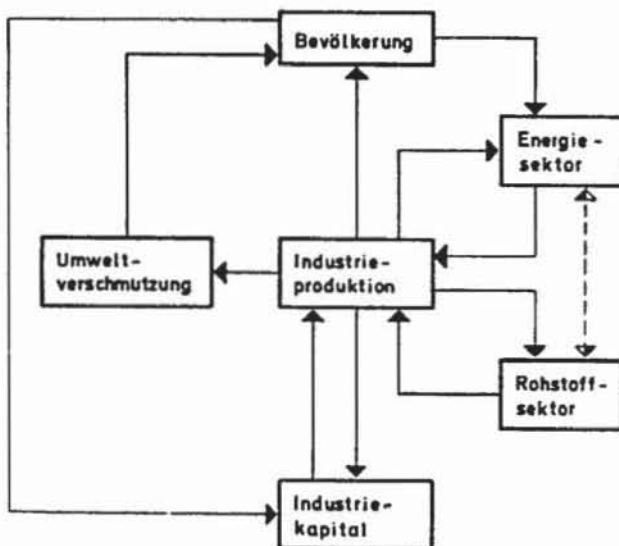


Bild 4. Grundstruktur des Weltenergiemodells

die Bevölkerung und die industrielle Produktion, sowie ihre Verknüpfungen mit anderen durch die Energienutzung beeinflussten Bereichen. Auch diese Grundstruktur des Modells zeigt schon deutlich das Charakteristikum von komplexen Systemen: ihre Rückkopplungsstruktur.

Der Bevölkerungssektor beschreibt die Entwicklung der Bevölkerungszahl über die Geburten und Sterbefälle, wobei die Geburten- und Sterbeziffern dynamisch als Funktion des Lebensstandards und der Umweltsituation beschrieben werden. Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Produktion und Investition, industriellem Rohstoff- und Energieverbrauch und den notwendigen Kapitalaufwendungen zur Rohstoff- und Energiegewinnung sind im Industriesektor formuliert. Der Umweltsektor beschreibt die ökologischen Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten und gestattet die Simulation von Maßnahmen zur Verminderung der Umweltbelastung. Die Auswirkungen des Verbrauches nicht regenerierbarer Rohstoffe werden im Rohstoffsektor dargestellt. Er ist so aufgebaut, daß die Rohstoffrecycling mit ihren Auswirkungen explizit untersucht werden kann. Der Energiesektor soll wegen seiner zentralen Bedeutung etwas genauer beschrieben werden.

Wesentlichste Aufgabe des Energiesektors ist die Darstellung der Substitutionsprozesse zwischen den Primärenergieträgern Kohle, Erdöl, Erdgas und Kernenergie. Zur Darstellung der Dynamik der Substitutionsvorgänge wird ein Nutzwertansatz mit Verzögerungseffekt gewählt. Die Probleme bei der modellmäßigen Darstellung von Substitutionsmechanismen liegen begründet in den vielen unterschiedlichen Faktoren, die eine Substitution bewirken. Diese zum Teil subjektiven Determinanten und Antriebskräfte einer Substitution sind einer quantitativen Beschreibung oft nur schwer zugänglich. Es erscheint aber nicht vertretbar, sie deshalb aus den Betrachtungen auszuklammern und ihre Wirkungen und Einflüsse nur wegen der Problematik ihrer Quantifizierung nicht zu erfassen.

In dem hier beschriebenen Modell wurden die Energiekosten, die Verfügbarkeit und die Nutzungseigenschaften als Indikatoren zur Beschreibung der Substitution benutzt. Die drei Indikatoren müssen zunächst bewertet und vergleichbar gemacht werden. Dies geschieht über eine Nutzwertfunktion, die einer bestimmten Indikatoreausprägung einen Nutzwert zuweist. Hat man mit Hilfe der

Nutzwertfunktion die Indikатораusprägung bewertet und vergleichbar gemacht, so sind die drei Indikatoren im Hinblick auf ihre Bedeutung für den Substitutionsprozeß zu beurteilen; dazu dienen zeitvariable Gewichtsfaktoren. Die gewichteten Indikatornutzwerte eines jeden Primärenergieträgers werden zum Gesamtnutzen dieses Energieträgers zusammengefaßt. Die relativen energieträgerspezifischen Gesamtnutzenwerte bestimmen über einen Verzögerungsansatz der Form

$$\tau \frac{d \bar{m}_i}{dt} + \bar{m}_i = \frac{G N_i(t)}{\sum_i G N_i(t)}$$

mit

\bar{m}_i = Anteil des Energieträgers i am Gesamtenergieverbrauch

τ = durchschnittliche Substitutionszeit

$GN_i(t)$ = Gesamtnutzen des Energieträgers i

Den Anteil eines Primärenergieträgers am Gesamtenergieverbrauch. Weiterhin beschreibt der Energiesektor noch den Mechanismus der Exploration, der wahrscheinliche Energie-reserven in nachgewiesene Reserven überführt.

Im folgenden soll exemplarisch nur eine der mit diesem Modell durchgerechneten Energie-versorgungsstrategien näher erläutert werden. Die Aussagen beschränken sich dabei gemäß den Zielsetzungen auf die weltweiten, langfristigen Strukturwandlungen und Entwicklungen der zukünftigen Energieversorgung. Den hier diskutierten Strategielauf liegen die folgenden Annahmen zugrunde

- Nutzbarer Vorrat an fossilen Primärenergieträgern: Kohle $4300 \cdot 10^9$ tSKE
Erdöl $320 \cdot 10^9$ tSKE
Erdgas $215 \cdot 10^9$ tSKE
- Einsatz der Kernreaktoren der ersten Generation (LWR) beginnend im Jahre 1970
- Einsatz der fortgeschrittenen Reaktortypen (HTR u. Schneller Brüter) ab 1985
- Verbreiterung der Rohstoffbasis durch die Schonung der fossilen Energieträger
- Einführung der Rohstoffrecyclingung
- Einführung von Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltbelastung
- Stabilisierung der Weltbevölkerung im Jahre 2050

Bild 5 zeigt die Entwicklung der wichtigsten Modellgrößen (Weltbevölkerung, Energiereserven, Energieverbrauch, Rohstoffreserven, Industrieproduktion pro Kopf, Umweltverschmutzung) für den Zeitraum von 1900 bis 2100. Interpretiert man die Ergebnisse, so läßt sich sagen, daß mit Hilfe der diesem Simulationslauf zugrunde gelegten Maßnahmen sich das Weltwirtschaftssystem in einen quasistationären Zustand überführen ließe, der gekennzeichnet ist durch eine Bevölkerungszahl von etwa $8 \cdot 10^9$ Menschen und einem materiellen Lebensstandard, der etwa sechsmal so hoch wie der heutige Weltdurchschnitt ist, somit dem der USA heute entspricht. Mit der Nutzbarmachung der Kernenergie würden ausreichende Energiemengen für absehbare Zeiten

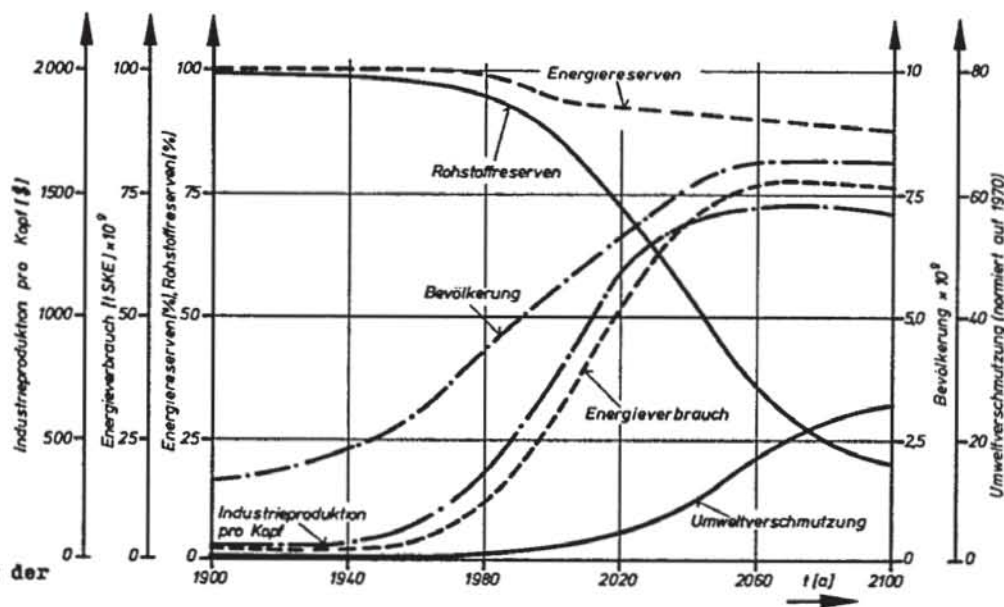


Bild 5. Zeitliche Entwicklung der wichtigsten Modellgrößen.

zur Verfügung stehen. Die zu dieser Simulationsstrategie korrespondierende Entwicklung der Energieversorgungsstruktur zeigt Bild 6. Erdöl und Erdgas werden infolge ihrer beschränkten Reserven nach der Jahrhundertwende an Bedeutung verlieren. Die Kernenergie wird zum Hauptenergielieferanten.

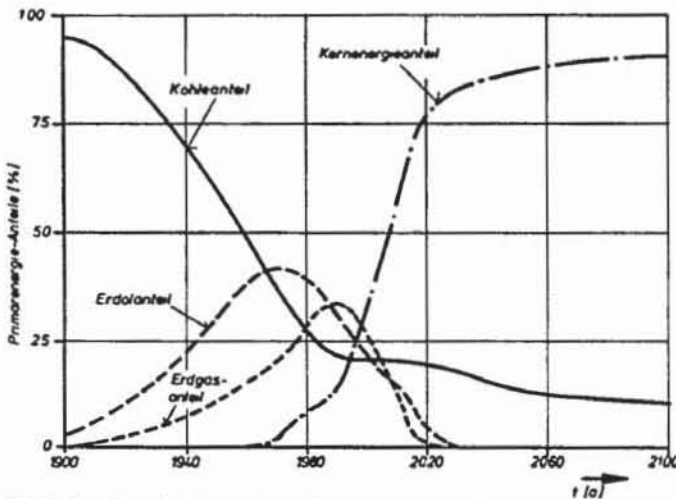


Bild 6. Entwicklung der Energieversorgungsstruktur

Die Entwicklung derart komplexer Modelle steht noch am Anfang. Insbesondere ihr heute noch großer Approximationsgrad beschränkt ihre Aussagefähigkeit. An der Weiterentwicklung in dieser Richtung und an der Übertragung auf abgegrenzte Räume wird aber gearbeitet.

Die hier kurz erläuterten Beispiele können natürlich nur einen unvollständigen Einblick über die Anwendungsmöglichkeiten der Systemtechnik für die Energieplanung geben. Die neuen Anforderungen an eine integrierte Energieversorgung, gekennzeichnet durch neue ökologische, ökonomische und versorgungstechnische Randbedingungen, bieten der Systemtechnik ein breites Anwendungsgebiet bei der Planung einer integrierten Energieversorgung auf allen Ebenen. Dieser Vortrag sollte die Notwendigkeit der Anwendung systemtechnischer Methoden für die Energieplanung aufzeigen und ihre Möglichkeiten an zwei Beispielen erläutern.

Schriftur

[1] Vagemann, K.: Beitrag zu Systemuntersuchungen über die langfristigen wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten verschiedener Kraftwerkstypen unter besonderer Berücksichtigung des Thoriumhochtemperaturreaktors. KFA-Jülich, JÜl-590-RG, 1969

[2] Meier, W., u. A. Voß: RESTRAPRO, ein Reaktorstrategieprogramm. KFA-Jülich, IRE-2-72

[3] A. Voß: Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch-Energie-Umwelt. KFA-Jülich, JÜl-982-RG, 1973