

Modellsimulation zur Analyse der weltweiten Energieprobleme

Dr. Ing. F. Niehaus, Dr. Ing. A. Voss, KFA-Jülich

Teil 2 und Schluß

3. Ergebnisse einiger Simulationsstrategien

3.1 Wie lange reichen die fossilen Energieträger?

Im folgenden werden einige mit den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Modellansätzen gewonnene Ergebnisse erläutert. In einer ersten Strategie soll untersucht werden, ob eine zukünftige Energieversorgung allein auf fossiler Basis möglich sein kann. Wir untersuchen deshalb die Entwicklung des Weltenergiesystems quasi unter status-quo-Bedingungen im Energiesektor. Die Entwicklung der wichtigsten Modellgrößen bis zum Jahre 2100 wird in **Bild 6** dargestellt. Es ist wichtig hier anzumerken, daß eine Rohstoffverknappung, die als zeitlich erste Wachstumsgrenze in anderen Strategien auftritt, hier durch eine Rezyklierung der Rohstoffe nach marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten vermieden werden kann.

Der Energieverbrauch, der von 1900 bis 1970 von $0,75 \cdot 10^9$ auf über $7 \cdot 10^9$ t SKE/a exponentiell anstieg, wächst auch bis in das nächste Jahrtausend exponentiell weiter. Die Folge dieses Wachstums ist die Erschöpfung der Energiereserven (nur fossil), die damit zum Verursacher der Krise werden, die gekennzeichnet ist durch den rapiden Rückgang der Bevölkerung und des materiellen Lebensstandards (hier ge-

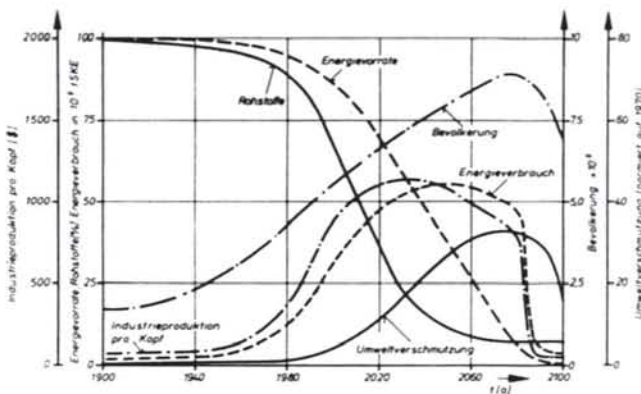


Bild 6: Entwicklung des Systemverhaltens unter status-quo-Bedingungen.

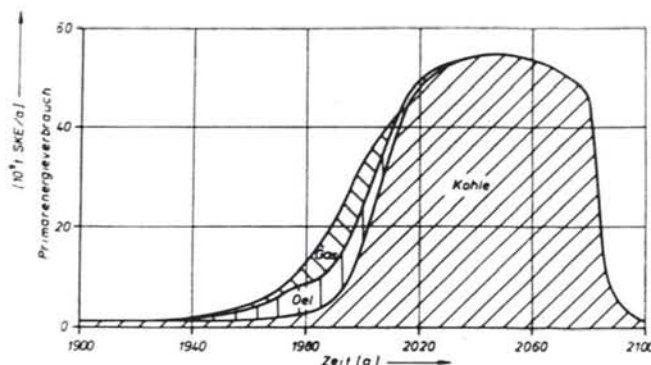


Bild 7: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs unter status-quo-Bedingungen.

messen durch die Größe Industrieproduktion pro Kopf). In diesem Simulationsverlauf waren zugrunde gelegt an nutzbaren Energievorräten $4300 \cdot 10^9$ t SKE Kohle, $320 \cdot 10^9$ t SKE Erdöl und $265 \cdot 10^9$ t SKE Erdgas.

Die Erschöpfung der Erdöl- und Erdgasvorräte erzwingt grundlegende Änderungen in der Struktur der Energieversorgung. Ähnlich wie zwischen 1900 und 1970, als die Kohle ihre Stellung als Hauptenergielieferant verlor, findet etwa ab Ende dieses Jahrhunderts derselbe Prozeß nur mit umgekehrten Vorzeichen statt (**Bild 7**). Energiepolitisch beängstigend ist dabei vor allem die Tatsache, daß für diese grundlegenden erzwungenen Änderungen nur etwa 25 a zur Verfügung stehen und dies bei weiter anwachsendem Gesamtenergiebedarf. Auch die Annahme größerer nutzbarer Vorräte für das Erdöl und das Erdgas bessert diese Situation nicht.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß die Epoche des Erdöls und Erdgases, die heute etwa $\frac{2}{3}$ des Primärenergiebedarfs abdecken, in geschichtlichen Zeiträumen gemessen, nur eine kurze Episode darstellt und daß die fossilen Energieträger eine langfristige Energieversorgung nicht sicherstellen können. Weit vor der Erschöpfung der Vorräte der fossilen Energieträger würde aber schon eine andere Grenze der Entwicklung erreicht, denn diese Verbrauchsraten fossiler Energieträger führen zu den in **Bild 8** dargestellten CO_2 -Emissionen, die ihren Maximalwert mit etwa $40 \cdot 10^9$ t Kohlenstoff pro Jahr in der Mitte des folgenden Jahrhunderts erreichen. Die resultierende atmosphärische CO_2 -Konzentration mit einem Anstieg auf nahezu 1500 ppm v, entsprechend einer Verfünfachung des natürlichen Betrags, läßt einen Temperaturanstieg erwarten, der bereits in 50 Jahren mehr als 3°C über dem heutigen Niveau liegt und gegen Ende des nächsten Jahrhunderts einen Maximalwert von 9°C erreichen würde. Dies bedeutet, daß der Entwicklung des menschlichen Gesamtsystems aufgrund der CO_2 -Emission eine Grenze gesetzt wäre, die zeit-

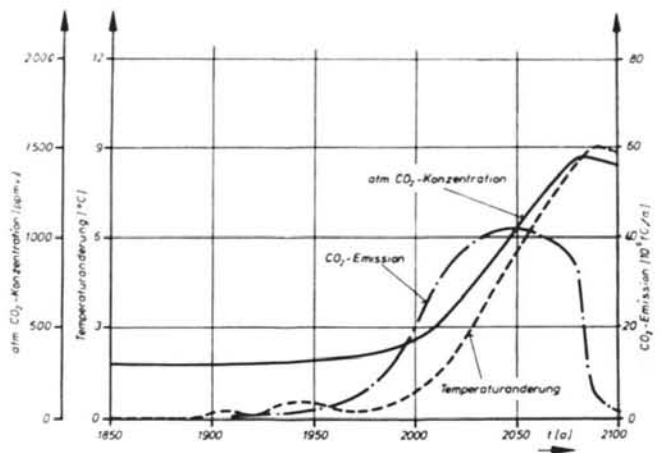


Bild 8: CO_2 -Belastung der Atmosphäre unter status-quo-Bedingungen.

lich erheblich früher wirksam würde als die Erschöpfung der fossilen Energiereserven. Eine Energieversorgung der Menschheit, die nur auf fossilen Energieträgern basiert, führt in weniger als 50 Jahren zu unzulässig hohen CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre.

3.2 Einsatz der Kernenergie

Kann nun der Einsatz der Kernenergie die Probleme der Energieverknappung und der unzulässigen Temperaturerhöhung lösen?

Untersuchen wir zunächst die Auswirkungen des Einsatzes der Kernreaktoren der ersten Generation, d. h. im wesentlichen der Leichtwasserreaktoren (LWR), die ihre technische Zuverlässigkeit und ihre Wirtschaftlichkeit mittlerweile bewiesen haben. Die Auswirkungen zeigen die **Bilder 9** und **10**. Die Leichtwasserreaktoren wurden ab 1970 zur Energieerzeugung mit herangezogen. Das Systemverhalten (Bild 9) weist eine große Übereinstimmung mit dem vorangegangenen Lauf auf, d. h. auch hier treten trotz der um die Kernenergieserven mit einem Energieäquivalent von $202 \cdot 10^{12}$ t SKE größeren Energiereserven Verknappungsprobleme auf. Zu erklären ist dies mit dem schlechten Konversionsfaktor der LWR, der nur eine unzureichende Ausnutzung des Energiepotentials der Kernbrennstoffe erlaubt.

Der Anteil der Kernenergie (Bild 10) nimmt nach ihrer Einführung schnell zu und erreicht um die Jahrhundertwende einen Anteil von 25%. Diese Wachstumsphase der Kernenergie wird etwa 20 Jahre später durch die Verknappung des Kernbrennstoffs gestoppt. Bemerkenswert ist, daß trotz des Einsatzes der Kern-

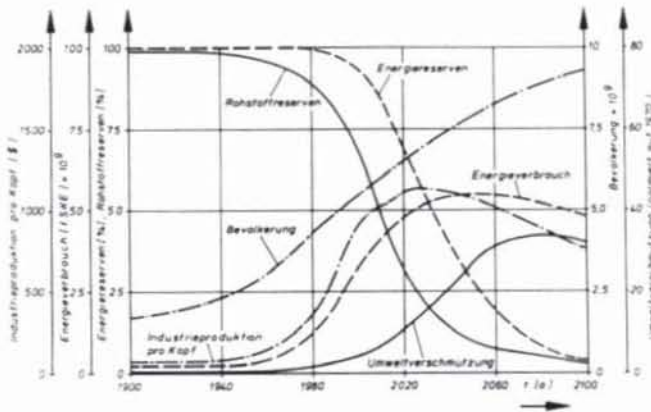


Bild 9: Systemverhalten beim Einsatz von Kernreaktoren der ersten Generation.

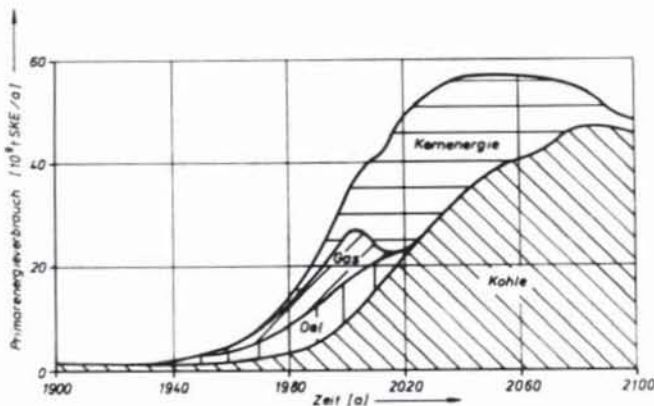


Bild 10: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs beim Einsatz von Kernreaktoren der ersten Generation.

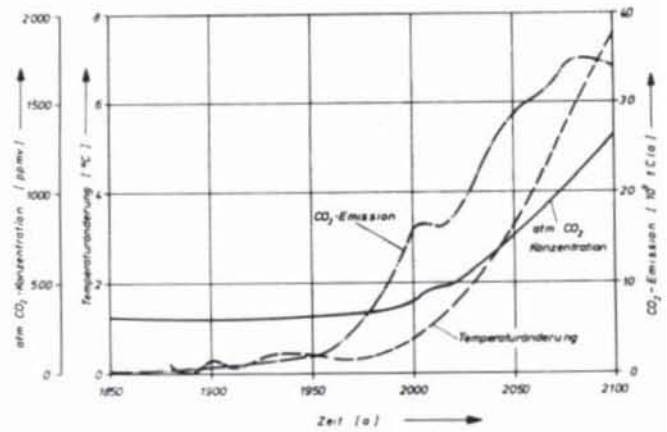


Bild 11: CO_2 -Belastung der Atmosphäre beim Einsatz von Kernreaktoren der ersten Generation.

energie mit ihrer ersten Reaktorgeneration eine Renaissance der Kohle zu Anfang des nächsten Jahrhunderts stattfindet. Der Primärenergieverbrauch erreicht um die Mitte des nächsten Jahrhunderts mit etwa $55 \cdot 10^9$ t SKE/a seinen Maximalwert (heutiger Verbrauch etwa $7,5 \cdot 10^9$ t SKE/a).

Als Folge dieser Verbrauchsdaten fossiler Energieträger entstehen die in Bild 11 dargestellten CO_2 -Emissionen. Der Einsatz der Kernenergie läßt sie gegenüber dem Verlauf in Bild 8 geringer ansteigen und zu Beginn des nächsten Jahrhunderts etwa für 20 Jahre leicht abnehmen. Der Grund dafür, daß diese Abnahme nicht so hervortritt wie die Abnahme des fossilen Primärenergieverbrauchs, liegt an den höheren spezifischen Emissionen der Kohle gegenüber Erdöl und Erdgas.

Nach 2020 steigen die CO_2 -Emissionen aber wieder stark an und erreichen gegen Ende des nächsten Jahrhunderts ein Maximum von $35 \cdot 10^9$ t C/Jahr. Die resultierende CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre zeigt eine Verdopplung zwischen 2030 und 2040 und erreicht am Ende des Betrachtungszeitraums einen Anstieg auf 1300 ppm v mit noch wachsender Tendenz. Die Temperaturerhöhung überschreitet in der Mitte des nächsten Jahrhunderts 3°C gegenüber heutigem Niveau und erreicht am Ende des Berechnungszeitraums etwa $7,2^\circ\text{C}$.

Damit ist eindeutig ersichtlich, daß der alleinige Einsatz von Reaktoren der 1. Generation nicht in der Lage ist, das CO_2 -Problem zu lösen, sondern nur eine zeitliche Verschiebung des Problems bewirkt.

3.3 Lösungsstrategien

Beide in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Strategien können die anstehenden Probleme nicht langfristig lösen, da sie zum einen eine Energieverknappung und unzulässige Klimaänderungen nicht verhindern und zum anderen ein Absinken der Industrieproduktion pro Kopf, die hier als Maßzahl für den materiellen Lebensstandard angesehen werden kann, in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts nicht vermeiden können. Ursache der letzteren Entwicklung ist die mit der Verknappung der Energiereserven einhergehende Steigerung der Kosten zur Gewinnung der Energie.

Wir wollen nun untersuchen, ob und welche Strategien denkbar sind zur Erreichung eines langfristig wünschbaren Zustandes, der gekennzeichnet ist durch ein angemessenes konstantes Niveau des materiellen Le-

bensstandards. Zusätzlich zu den in den vorangegangenen Strategien schon ergriffenen Maßnahmen wie Rohstoffzyklisierung und Einführung der ersten Generation von Kernreaktoren unterstellen wir, daß die folgenden zusätzlichen Maßnahmen ergriffen bzw. durchgeführt werden:

- Stabilisierung der Weltbevölkerung bis zum Jahre 2050
- Reduzierung der Umweltbelastung
- Unverzögerter Einsatz der fortgeschrittenen Reaktortypen und die Nutzbarmachung weiterer Energiequellen
- Schonung der fossilen Energieträger zur Verbreiterung der Rohstoffbasis

Für den Energiesektor heißt dies, daß der Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren, gemeint sind der Hochtemperaturreaktor und der Schnelle Brüter, sobald wie möglich erfolgt. Außerdem wird unterstellt, daß in dem nächsten Jahrhundert weitere Energiequellen (z. B. Sonnenenergie) zur großtechnischen Nutzung zur Verfügung stehen. Die fortgeschrittenen Reaktoren bieten im wesentlichen zwei Vorteile gegenüber dem Leichtwasserreaktor. Ihr hoher Konversions- bzw. Brutfaktor erlaubt die volle Nutzung der Kernbrennstoffvorräte und erst ihr Einsatz ermöglicht eine vollständige Substituierbarkeit der fossilen Energieträger. Letzteres ermöglicht im wesentlichen der Hochtemperaturreaktor wegen seines hohen Temperaturniveaus, und damit der Möglichkeit der Erzeugung von Prozeßwärme und der nuklearen Wasserspaltung zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff.

Den Erfolg dieser Maßnahmen zeigt **Bild 12**. Der erreichte stationäre Zustand ist gekennzeichnet durch eine Bevölkerungszahl von ca. $8 \cdot 10^9$ Menschen und einen materiellen Lebensstandard, der etwa sechsmal so hoch wie der heutige Weltdurchschnitt ist. Der durchschnittliche pro-Kopf-Verbrauch an Energie entspricht dabei etwa dem heutigen Verbrauch in den Vereinigten Staaten. Die zu dieser Gleichgewichtsstrategie gehörende Entwicklung des Primärenergieverbrauchs zeigt **Bild 13**. Durch die Schonung der fossilen Energieträger, im wesentlichen der Kohle zur Verbreiterung der Rohstoffbasis, ist der kumulierte Verbrauch der fossilen Energieträger für energetische Zwecke wesentlich geringer als in den beiden vorangegangenen Strategien.

Somit tritt auch bei den in **Bild 14** dargestellten CO_2 -Emissionen eine wesentliche Verminderung ein. Es zeigt sich, daß mit dieser Strategie eine maximale

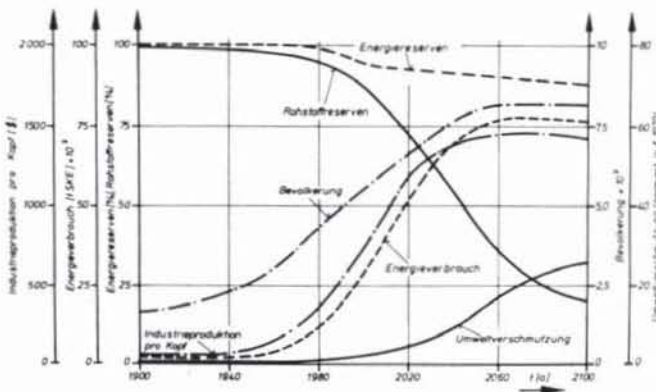


Bild 12: Systemverhalten bei Maßnahmen der Lösungsstrategie.

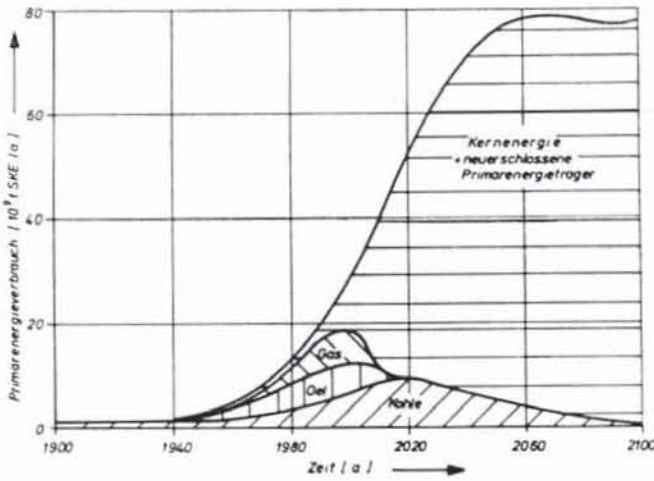


Bild 13: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs bei der Lösungsstrategie.

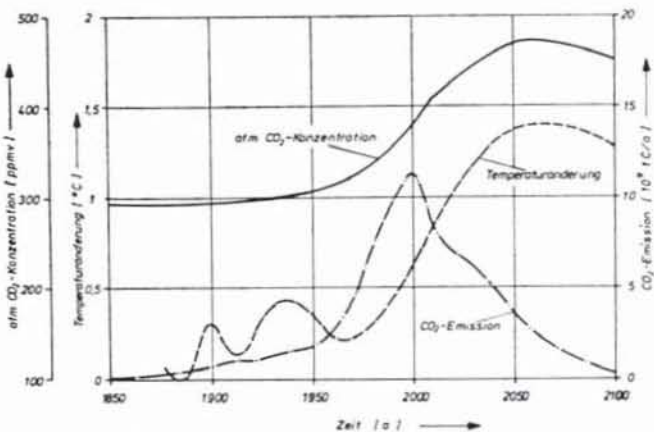


Bild 14: CO₂-Belastung der Atmosphäre bei der Lösungsstrategie.

Temperaturerhöhung von 1,1° C über das heutige Niveau zu Beginn der zweiten Hälfte des nächsten Jahrhunderts auftritt, aufgrund einer atmosphärischen Maximalkonzentration von 470 ppm v. Eine frühere Reduzierung der CO₂-Emissionen würde zu geringeren Konzentrationen führen. Eine solche Annahme scheint aber unrealistisch in Anbetracht der noch zu leistenden Entwicklungsarbeit.

Ob eine solche Temperaturerhöhung ohne tiefgreifende Auswirkungen auf das Klima der Erde bleibt, kann heute noch nicht mit Bestimmtheit festgestellt werden. Ihre Relation zu den Temperaturschwankungen der Nordhalbkugel in den vergangenen 100 Jahren geht aus dem Bild hervor.

Faßt man die für die Energieplanung wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung zusammen, so ergeben sich für die Zukunft folgende Aspekte:

1. Die materiellen und ökologischen Wachstumsgrenzen (Energie- und Rohstoffverknappung, Umweltverschmutzung) der Erde sind bei weiter anhaltendem exponentiellem Wachstum greifbar nahe.

2. Die Bedeutung von Erdöl und Erdgas als Energieträger wird auch bei optimistischen Annahmen über ihre nutzbaren Vorräte nach der Jahrhundertwende zurückgehen.
3. Mit der vollen Nutzbarmachung der Kernenergie stehen langfristig ausreichende Energiereserven zur Verfügung.
4. Die erste Generation der Kernreaktoren kann wegen ihres hohen spez. Uranverbrauchs nur eine Übergangslösung darstellen.
5. Nur der rechtzeitige Einsatz der fortgeschrittenen Reaktortypen kann schwerwiegende Umstrukturierungsprobleme bei der Energieversorgung vermeiden.
6. Die unverzögerte Nutzung der Kernenergie wirkt stabilisierend auf das Energiepreisniveau.
7. Die notwendige Erweiterung der Rohstoffbasis ist durch eine verminderte Nutzung der fossilen Energieträger für energetische Zwecke möglich. Dies aber bedingt die Schaffung der notwendigen Voraussetzungen für einen forcierten Einsatz der Kernenergie und die Nutzbarmachung anderer Energiequellen.
8. Die Rolle der Kernenergie als Substitut für die fossilen Energieträger kann für die nächsten Jahrzehnte von anderen Energieträgern nicht übernommen werden, da entweder ihr Potential zu klein ist (Wasserkraft, geothermische Energie, Gezeitenenergie) oder ihre Nutzungskosten zu hoch und ihr Entwicklungsstand noch unzureichend ist (Sonnenenergie).
9. Unzulässige globale Veränderungen des Klimas sind nur durch eine forcierte Substitution der fossilen Energieträger vermeidbar.
10. Allein die Technik und ihre zukünftige Weiterentwicklung kann die notwendigen materiellen Voraussetzungen und Hilfsmittel für einen Übergang des Weltwirtschaftssystems in einen quasi stationären Zustand mit einem hohen Niveau des materiellen Lebensstandards schaffen.

Literatur

- [1] Voss, A.: Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch-Energie-Umwelt – Jül-982-RG, Juli 1973.
- [2] Niehaus, F.: Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energieerzeugung: CO₂ und H₂ – Jül-1165-SE, 1975.
- [3] Manabe, S. u. a.: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a given Distribution of Relative Humidity. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 24, No. 3, 1967, S. 241–259.
- [4] SCEP: Man's Impact on the Global Environment. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, S. 46/62.
- [5] Callendar, G.: On the Amount of Carbon Dioxide in the Atmosphere, Tellus 8, 1956, S. 176–183.
- [6] Mitchell, J., A Preliminary Evaluation of Atmospheric Pollution as a Cause of the Global Temperature Fluctuation of the Past Century, aus Singer, F. (ed.), Global Effects of Environmental Pollution, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1970, S. 139–155.
- [7] Budyko, M.: The effect of solar radiation variation on the climate of the Earth, Tellus 21, No. 5, 1969, S. 611–619.