

Modellsimulation zur Analyse der weltweiten Energieprobleme

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

1. Weltweite Energieprobleme

Die Energiekrise oder besser gesagt die Ölkrise des letzten Jahres, von deren Auswirkungen wir unmittelbar betroffen waren, hat uns die Bedeutung einer gesicherten Energieversorgung für unsere hochindustrialisierte Gesellschaft drastisch vor Augen geführt. Es ist natürlich jetzt müßig zu fragen, ob diese Krise nicht vorhersehbar oder gar vermeidbar gewesen wäre. Auf der anderen Seite kann man ihr aber als Positivum anrechnen, daß sie durch ihren Schock auch die breite Öffentlichkeit auf die dringenden Probleme der Energieversorgung aufmerksam gemacht hat und damit vielleicht gerade noch rechtzeitig Entwicklungen eingeleitet hat, die eine weit größere Krise zu einem späteren Zeitpunkt verhindern. Die verstärkten Anstrengungen der führenden Industrieländer zur Entwicklung neuer Energieversorgungssysteme sind ein unmittelbarer Ausfluß der Ölkrise.

Die globalen Energieprobleme haben sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend geändert. Exponentielles Wachstum des Energiebedarfs, begrenzte Reserven der fossilen Energieträger, vor allem des Erdöls und Erdgases, lange Zeitkonstanten der Entwicklung und Einführung neuer Energiesysteme sowie die zunehmende Belastung der Umwelt durch den Energieverbrauch sind einige der Schlüsselbegriffe, die die veränderte Situation beschreiben. Sie machen aber auch gleichzeitig deutlich, daß die Energieversorgung nicht länger als ein isoliertes technisch-ökonomisches Problem angesehen werden kann, 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. Diese Verzahnung der Energieprobleme stellt neue Anforderungen an die Energieplanung, dies trifft für die langfristige Planung ebenso zu wie für die kurzfristige. Jeder, der eine Entscheidung fällt, macht sich eine Vorstellung von deren Folgen. Hierzu bedient er sich bewußt oder unbewußt eines Modells, das ihm die Folgen seiner Entscheidung aufzeigt und ihre Beurteilung möglich macht. Intuitive Modelle müssen aber da versagen, wo eine Vielzahl von Einflußgrößen, Funktionszusammenhängen und deren Verknüpfung zu berücksichtigen sind, um eine entscheidungsadäquate Abbildung der Wirklichkeit zu erreichen. Komplexe Probleme, wie die der Energieversorgung, erfordern die Erstellung mathematischer Modelle. Dies bringt zwei Vorteile mit sich, einmal müssen wegen der mathematischen Formulierung alle Annahmen und Zusammenhänge exakt formuliert werden, sie sind damit überprüf- und diskutierbar, und zum anderen wird die Verwendung des Computers möglich. Der Computer dient dabei als Instrument, um die limitierte Speicherfähigkeit des menschlichen Denksystems auszugleichen und zur schnellen Berechnung der Systementwicklung, die bestimmt wird durch die Vielzahl der funktionalen Zusammenhänge der Systemvariablen.

Im folgenden sollen die Ergebnisse einer Modelluntersuchung der globalen Energieprobleme erläutert wer-

den [1, 2]. Ziel dieser Untersuchung war nicht die Prognose des zukünftigen Energiebedarfs, sondern die Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Energiesystems, die Suche nach kritischen Zuständen sowie notwendigen technischen Innovationen und politischen Strategien zu ihrer Vermeidung und damit zur Sicherstellung einer auch langfristig ausreichenden Energieversorgung.

2. Beschreibung der Modelle

2.1 Das Energiemodell

Die zur Analyse der globalen Energieprobleme entwickelten Simulationsmodelle werden im folgenden so beschrieben, daß zunächst einmal das Gesamtmodell erläutert wird. Daran anschließend erfolgt exemplarisch am CO₂-Modell die Erläuterung eines Teilmodells des Umweltsektors. Beide Modelle sind in einer Simulationssprache geschrieben, die es erlaubt, 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.

Der Energiebedarf läßt sich zurückführen auf das Verlangen der Menschen, durch den Einsatz von Energie ihre natürlichen Lebensbedingungen wie Hunger und Kälte zu überwinden und mit Hilfe von Energie zu einer menschenwürdigeren Gestaltung ihrer Umgebung und Lebensbedingungen zu gelangen. Der Energiebedarf wird damit also durch die Bevölkerungszahl und den spez. Energiebedarf determiniert, der, wie statistische Untersuchungen zeigen, eng gekoppelt ist an den wirtschaftlichen und industriellen Entwicklungsstand einer Volkswirtschaft. Die Beschreibung der Ursachen für die Nachfrage nach Energie kann aber nur Teil einer umfassenden Analyse sein. Ein anderer, ebenso wichtiger Teil ist die Erfassung und Untersuchung der Auswirkungen der Energienutzung. Dazu gehören z. B. die Erschöpfung der Energiereserven und die Veränderung der natürlichen Umwelt, zwei Effekte, die wiederum auf den Energieverbrauch zurückwirken.

Bild 1 zeigt die Grundstruktur des Modellansatzes.

Neben den beiden Hauptbestimmungsgrößen des Energiebedarfs (Bevölkerung und Industrieproduktion) enthält das Modell auch die grundlegenden Beziehungen zwischen Energieverbrauch, Energiereserven, industrieller Produktion, Rohstoffverbrauch und Umweltbeeinflussung. Das Gesamtmodell läßt sich in fünf Sektoren einteilen. Der Bevölkerungssektor beschreibt die Entwicklung der Bevölkerungszahl über die Geburten und Sterbefälle pro Jahr, wobei die Geburten- und Sterbeziffern dynamisch beschrieben werden. Die komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen einer modernen Industrieproduktion sind im Rahmen dieser Untersuchung nicht im Detail darstellbar. Der Industriesektor beschreibt deshalb nur die grund-

Bei den folgenden Umwandlungen in Zellbausteine werden 20 bis 30% in der Atmungskette wieder abgebaut, um die dazu notwendige Energie zu erhalten.

Die tierischen Zellen beziehen ihre Energie durch die Atmung, indem prinzipiell die Photosynthese umgekehrt wird. Dabei entstehen wieder CO_2 und Wasser, die damit diesen Stoffkreislauf schließen, der mit wenigen Ausnahmen die Grundlage für das Leben auf der Erde bildet.

Die hier angesprochenen Konzentrationen sind weit davon entfernt, schädliche Wirkungen auf Organismen auszuüben, vielmehr wirken sie im Gegenteil anregend auf die Assimilation der Pflanzen, ein Effekt, der sich in Gewächshäusern ausnutzen läßt. Eine Gefahr liegt in der Rolle begründet, die dem Kohlendioxid im Energiehaushalt der Atmosphäre zukommt.

Mit etwa 15°C liegt die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche um 34°C über einer aus der Albedo der Atmosphäre (29%) errechenbaren Gleichgewichtstemperatur. Der Grund dafür liegt in einer Durchlässigkeit der Atmosphäre für das Spektrum des Sonnenlichtes von 48%, für das Abstrahlungsspektrum der Erde aber von nur 20%. Dieser Treibhauseffekt ist von ausschlaggebender Bedeutung für das Klima der Erde und beruht zu etwa 13% auf der Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre und zum weitaus größten Teil auf dem Wasserdampfgehalt (etwa 55%).

Mit Hilfe einer eindimensionalen Modellatmosphäre errechneten Manabe et al. [3] einen Einfluß veränderter CO_2 -Konzentrationen auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre wie er in Bild 3 dargestellt wird. Für eine Verdoppelung der Konzentration von 300 auf 600 ppm Volumenanteile ergibt sich eine Erwärmung der unteren Troposphäre um $2,36^\circ\text{C}$ verbunden mit einer Abkühlung der Stratosphäre. Dabei wurde von einer

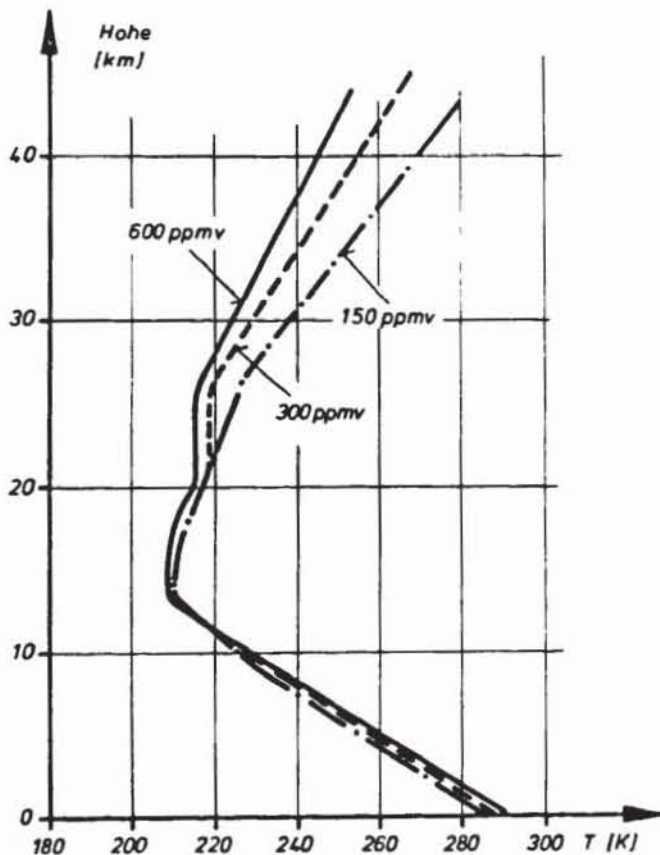


Bild 3: Temperaturprofile der Atmosphäre für unterschiedliche CO_2 -Konzentrationen (nach [3]).

durchschnittlichen Bewölkung und einer Konstanz der relativen Luftfeuchtigkeit ausgegangen.

2.2.2 Der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre

Kohlendioxid kommt in der Atmosphäre nur als Spurenbestandteil vor. Seine Konzentration beträgt etwa 325 ppm Volumenanteile. Obwohl es schon im vorigen Jahrhundert Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen war, liegen verlässliche Meßwerte über seine atmosphärische Konzentration erst seit 1958 vor [4]. Zwei Ergebnisse sind aber eindeutig ablesbar. Weltweit ist ein Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration zu verzeichnen, der bis zum Jahr 1970 0,7 ppm v pro Jahr betrug. Das entspricht einer jährlichen Zunahme von 0,2%. Der Meßzeitraum ist nicht groß genug, um Aussagen über eine Abweichung von einem linearen Anstieg machen zu können. Weiterhin ist ein Anstieg der Konzentration mit zunehmender nördlicher Breite zu erkennen. Der Unterschied zwischen der Meßstation in der Antarktis und in Alaska beträgt ungefähr 1,5 ppm v. Die Konzentrationen sind jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, die auf Mauna Loa (Hawaii) 6 ppm v betragen und nach Norden hin zunehmen und auf der Südhalbkugel sehr gering sind. Sie nehmen mit steigender Höhe ab. Mit dem Grad der nördlichen Breite ist eine Phasenverschiebung nachgewiesen worden, die auf dem horizontalen Transport des CO_2 in der Atmosphäre beruht. Für diese Schwankungen sind die Assimilationsraten der Pflanzen verantwortlich sowie die Emissionen durch Energieumwandlung und temperaturbedingte unterschiedliche Löslichkeit im Oberflächenwasser der Weltmeere. Abgesehen von diesen Abweichungen zeigt das Konzentrationsprofil über der Höhe der Atmosphäre im Gegensatz zu anderen Spurenbestandteilen eine Konstanz der Volumenanteile, mit Hilfe der sich die Gesamtmasse des CO_2 in der Atmosphäre sehr einfach bei 325 ppm v zu $260 \cdot 10^{10} \text{ t CO}_2$ berechnen läßt.

Über die Entwicklung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre vor 1958 liegen sehr unterschiedliche Angaben vor. Die Problematik der früheren Ergebnisse liegt neben der Ungenauigkeit der Analysemethoden in einer zu geringen Laufdauer der Versuchsreihen oder in der Wahl eines ungeeigneten Meßortes. Zum Beispiel können Meßwerte durch die Nähe großer Waldflächen in der Größenordnung von 100% verfälscht werden. Die umfangreichsten Literaturrecherchen wurden von Callendar [5] durchgeführt und legen für das 19. Jahrhundert einen Basiswert von $295 \pm 5 \text{ ppm v}$ nahe. Damit ergibt sich bis heute ein Gesamtanstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration von näherungsweise 10%.

2.2.3 Die Beschreibung der Grundstruktur des CO_2 -Modells

Um Aussagen über die zukünftige CO_2 -Belastung der Atmosphäre durch die Nutzung fossiler Energieträger ableiten zu können, wurde ein Modell des Kohlenstoffkreislaufs der Erde entwickelt, dessen Loopstruktur in Bild 4 wiedergegeben wird.

Dabei ist durch Pfeile gekennzeichnet, welche Größen des Systems in Wechselwirkung stehen. Die Pfeilrichtungen entsprechen der Ursache-Wirkungsbeziehung. Durch die Vorzeichen an den Spitzen wird festgelegt, ob eine positive Veränderung der Ursachengröße eine positive oder negative Veränderung der Wirkungsgröße zur Folge hat. Ist in einem geschlossenen Wir-

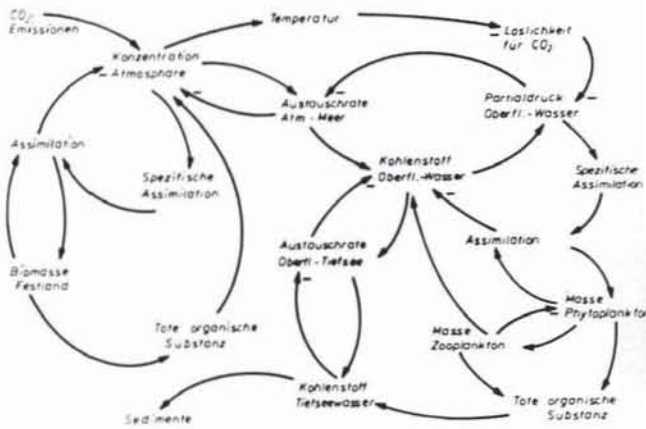


Bild 4: Die Loopstruktur des Kohlenstoffkreislaufs.

kungskreis (loop) die Anzahl der negativen Vorzeichen geradzahlig, so nennt man ihn positiv. In der Regel tragen negative loops zur Stabilisierung eines Systems bei. Kommen aber in ihm Zeitverzögerungen zur Wirkung, so daß schwingungsfähige Systeme entstehen, können Stabilitätsaussagen u. a. nur durch Frequenzganganalysen gewonnen werden.

CO₂-Emissionen in die Atmosphäre haben eine Erhöhung ihrer Konzentration zur Folge, auf die die Pflanzen des Festlandes mit einer steigenden spezifischen Assimilationsleistung reagieren. Die daraus resultierende Zunahme der Assimilationsrate führt zu einer Vergrößerung der Biomasse, die wiederum eine weitere Steigerung der Assimilationsrate zur Folge hat. Eine Stabilisierung dieser positiven Rückkopplung ist dadurch gegeben, daß durch die Assimilation der Atmosphäre Kohlendioxid entzogen und in der Biomasse des Festlandes gespeichert wird. Durch das Absterben der Pflanzen und die Zersetzung der toten organischen Substanz schließt sich dieser Kreislauf, dem noch einige kleinere Kreisläufe durch die Nahrungsketten der Tiere angegliedert sind, die man aber, wie noch im weiteren gezeigt wird, vernachlässigen kann. Kompliziertere Zusammenhänge ergeben sich in den Ozeanen. Hier befindet sich das Kohlendioxid in einem chemischen Gleichgewichtszustand mit vielen anderen gelösten Bestandteilen. Der resultierende Partialdruck beeinflusst durch das Konzentrationsgefälle Atmosphäre-Oberflächenwasserschicht die Absorption von CO₂ in den Ozeanen. Aus dem Oberflächenwasser wird Kohlenstoff durch die Assimilation des Phytoplanktons entzogen – wie auf dem Festland durch einen positiven Rückkopplungsprozeß über steigende spezifische Assimilationsraten. Dieser Kohlenstoff geht zum Teil in die tote organische Substanz des Meeres über. Der Rest folgt der Nahrungskette des Zooplanktons, von wo aus er einmal über die Atmung in das Oberflächenwasser zurückgelangt oder ebenfalls in die tote organische Substanz übergeht. Diese wird zersetzt und gelangt sowohl ins Oberflächen- wie Tiefseewasser. Zwischen diesen beiden Reservoiren besteht ein wichtiger Austausch aufgrund der Verwirbelung des Wassers durch Meeresströmungen.

Kompliziert wird der Kohlenstoffhaushalt der Erde noch zusätzlich durch eine positive Rückkopplung über das Klima. Wie oben beschrieben, führt eine Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur auch des Meerwassers. Mit steigender Temperatur vermindert sich die Löslichkeit für Kohlendioxid und erhöht seinen

Partialdruck, was wiederum eine Absorption durch die Ozeane behindert.

2.2.4 Teilverifizierung des Modellverhaltens

Da eine Diskussion einzelner Modellannahmen hier nicht vorgenommen werden kann (eine ausführliche Beschreibung erfolgte in [2]), wird an zwei Beispielen das Verhalten des Modells an der Vergangenheit überprüft.

Simulation des Konzentrationsanstiegs der Atmosphäre

Auf eine Eingabe der Verbrauchsdaten fossiler Energieträger der Vergangenheit reagiert das Modell mit einem Anstieg der CO_2 -Konzentration wie er in Bild 5 dargestellt wird. Die Abweichung von den neueren Meßdaten seit 1958 [4] beträgt weniger als 0,5 ppm v. Dazu mußte für das 19. Jahrhundert ein Basiswert von 295 ppm v zugrunde gelegt werden.

Simulation des Temperaturverlaufs der nördlichen Hemisphäre

In Bild 5 wurde die Temperaturentwicklung auf der Nordhalbkugel dargestellt, wie sie sich nach einer Bereinigung um die Verfälschung von Meßergebnissen durch die Nähe großer Städte ergibt [6]. Durch die Überlagerung des Trübungseffektes nach Daten aus [7] mit dem CO_2 -Effekt ergibt sich mit einer Zeitkonstanten von 7 Jahren für die anfängliche Angleichung der Temperaturen der Oberflächenwasserschicht und der Atmosphäre eine gute Übereinstimmung zwischen realen und simulierten Werten. Sie kann noch dadurch verbessert werden, daß der Einfluß der Trübung ver-

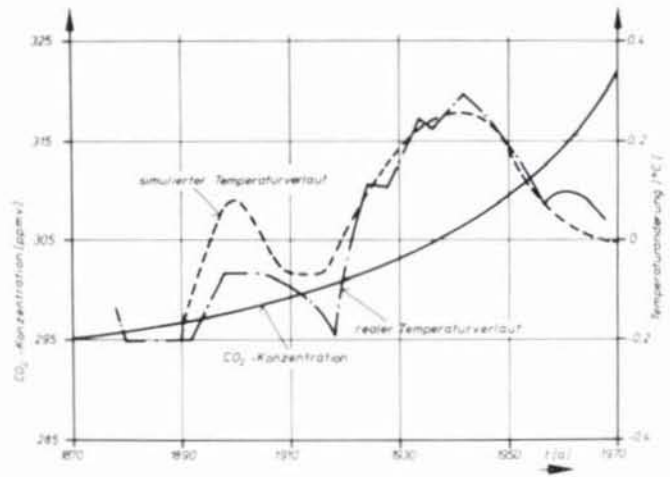


Bild 5: CO_2 -Modellverifizierung.

ringert und der Einfluß des CO_2 vergrößert wird und legt damit eher eine Unterschätzung des CO_2 -Effektes nahe.

Zur Sensitivität des Modells kann festgestellt werden, daß es eine bemerkenswerte Stabilität gegenüber Änderungen seiner Parameter besitzt. Lediglich in Annahmen darüber, inwieweit der Mensch die Waldflächen der Erde verändert, besteht eine sensible Stelle des Modells. Im folgenden wird in einer optimistischen Abschätzung davon ausgegangen, daß der Mensch durch sorgfältige Planung und wachsendes Umweltbewußtsein eine Vermehrung der Biomasse des Festlandes um 10% ermöglicht.

wird fortgesetzt!