

Energieverbrauch und Energie- reserven in der Zukunft

Von Univ. Prof. Dr. P. Weinzierl

Einleitung:

In den letzten Jahren häufen sich die Meldungen über eine drohende Energielücke: In den USA müssen trotz Liberalisierung der Ölimporte und großer Förderung im eigenen Land viele Tankstellen gesperrt werden, die Versorgung Westeuropas, die fast ganz von den Ölquellen der arabischen Länder abhängt, wird immer wieder durch neue Preiserhöhungen betroffen, in Österreich ist die Stromversorgung in regenarmen Jahren gefährdet, da $\frac{2}{3}$ aus Wasserkraft erzeugt wird, deren Produktionszuwachs wesentlich unter dem Verbrauchsanstieg liegt.

Es ist die Frage, ob hier eine echte Verknappung durch eine Diskrepanz zwischen dem Anstieg des Bedarfs und der Erzeugungsmöglichkeit vorliegt, oder ob diese Energiekrise auf einzelnen Sektoren durch wirtschaftspolitische und klimatische Faktoren bedingt ist und letzten Endes auf mangelnde Vorausplanung zurückgeht.

Aufsehenerregend war eine Publikation über „Die Grenzen des Wachstums“ von Dennis Meadows. Dort wird eine katastrophale Entwicklung der Menschheit und ihrer Versorgung für die Zeit von

2000 bis 2100 vorausgesagt. Eine drastische Verknappung von Lebensmitteln und anderen Rohstoffen, insbesondere auch Energiequellen, zusammen mit den Folgen der Umweltverschmutzung, soll in diesem Zeitraum zu einem drastischen Rückgang der Weltbevölkerung um einen Faktor 2–4 innerhalb einer Generation führen. So sehr die Grundtendenz dieses Buches bejaht werden kann, da es die Notwendigkeit einer vorausschauenden Planung ebenso deutlich vor Augen führt wie die Notwendigkeit einer weltweiten Beschränkung des Bevölkerungswachstums, so muß man ihm doch entgegenhalten, daß die für die Berechnungen zugrunde gelegten Zahlen im Sinne dieser Tendenz bewußt pessimistisch gewählt sind. So sind z. B. in den für das grundlegende „Weltmodell“ benützten Daten die Kernbrennstoffe Uran und Thorium nicht enthalten; die Kernenergie liefert zwar derzeit noch weniger als 1 % des gesamten Energieaufkommens der Erde, es sind sich jedoch alle Energiefachleute darüber einig, daß bereits in 30 Jahren etwa die Hälfte aller Stromerzeugung auf Kernspaltung basieren wird.

Es ist die Absicht dieser Darstellung zu untersuchen, wie real die Gefahren auf dem Energiesektor für die nächsten 100 Jahre sind und welche Auswege sich aus den erwarteten Versorgungsengpässen anbieten. Die Energieversorgung hängt eng mit der weiteren Entwicklung von Wohlstand und Zivilisation zusammen: tatsächlich sind Bruttonationalprodukt und Energieverbrauch verschieden ent-

wickelter Staaten einander in grober Näherung proportional.

Derzeitiger Energieverbrauch und Anstiegsrate

1971, dem letzten Jahr, für das statistische Unterlagen aus dem UN-Handbook entnommen werden können, betrug der Energieverbrauch ca. 6×10^{13} kWh/Jahr. Bis zum Jahre 2000 wird ein Anstieg um einen Faktor 3 bis 5 von verschiedenen Experten erwartet, was einer jährlichen Anstiegsrate um 4–6 % entspricht. Danach erhält man für das Jahr 2000 einen Verbrauch von $1,8\text{--}3 \cdot 10^{14}$ kWh/Jahr. Stärker noch als der Gesamtenergieverbrauch wird vermutlich der Verbrauch an elektrischem Strom ansteigen und bei einer Anstiegsrate von 7 % pro Jahr bleiben, was einer Verdoppelung in 10 Jahren entspricht.

Für längere Zeiträume kommt zur Unsicherheit der Abschätzungen der technischen und zivilisatorischen Entwicklung auf der gesamten Erde noch die Unsicherheit einer langfristigen Voraussage über das Bevölkerungswachstum hinzu. Wie auf Abb. 1 ersichtlich, hängt das Erreichen eines Sättigungswertes der Weltbevölkerung vom Zeitpunkt einer effektiven Geburtenkontrolle ab. Wie man sieht, ist ein Wert von 15 Mrd. Menschen im Jahr 2070 eine mittlere Schätzung. Nimmt man an, daß diese 15 Mrd. Menschen dann einen durchschnittlichen technischen Standard erreicht haben, der dem jetzigen Stand in den USA entspricht, so erhält man einen Jahresverbrauch von $2,6 \cdot 10^{15}$ kWh/Jahr. Wie die

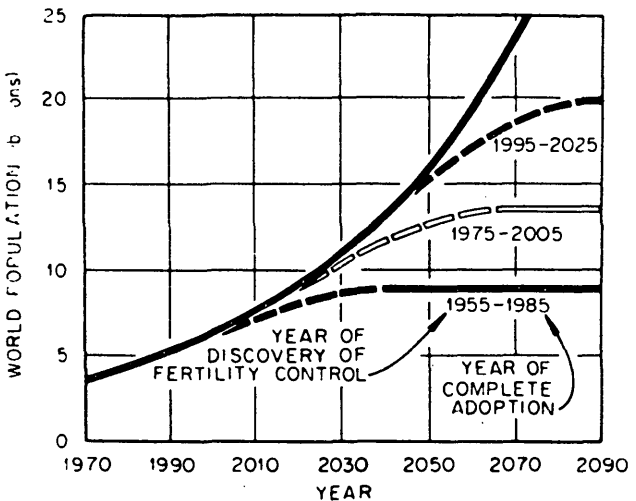


Abb. 1: Erwartete Weltbevölkerung bis 2090. Die oberste Kurve repräsentiert die Fortsetzung des derzeitigen Trends. Die darunterliegenden entsprechen verschiedenen Zeitpunkten für den Einsatz einer effektiven Geburtenkontrolle.

folgenden Ausführungen zeigen werden, kann ein Energieverbrauch dieser Größenordnung nur durch massive Nutzung der Kernenergie bedeckt werden.

Verteilung des derzeitigen Verbrauches auf die Energiequellen

Die kritisch werdende Lage der Energieversorgung hängt vor allem damit zusammen, daß in den Industriestaaten zwischen 60 und 70 % aller Energie aus Erdöl- und Erdgasvorräten gedeckt wird. Gerade dieser Verbrauch ist in den letzten Jahrzehnten absolut und prozentuell enorm angestiegen. Dem ste-

hen jedoch auf etwas längere Sicht völlig unzureichende Weltvorräte gegenüber. Wie Abb. 2 zeigt, erreicht die Produktionsmöglichkeit für Erdöl (je nach zugrunde gelegter Schätzung) zwischen 1990 und 2000 ein Maximum. Für Erdgas wird ein solches Maximum bereits zwischen 1980 und 1990 er-

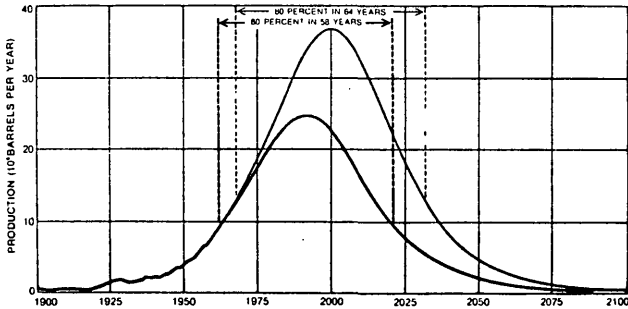
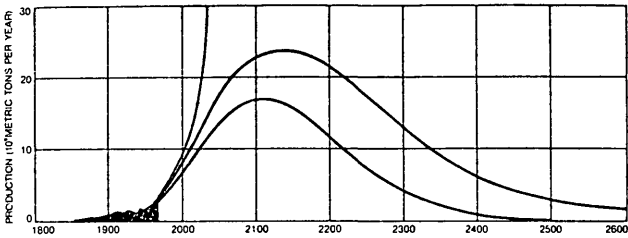


Abb. 2 Oben: Geschätzter Verlauf der Kohlenproduktion bis 2600. Die exponentielle Kurve gibt den gegenwärtigen Trend wieder, die beiden anderen entsprechen 2 Schätzwerten über die Größe der Vorkommen.

Unten: Geschätzter Verlauf der Erdölproduktion bis 2100 für 2 Annahmen über die Größe der Vorkommen.

wartet. Danach fällt die Produktion ab, während die dem jetzigen Trend entsprechende Verbrauchskurve steil ansteigt. Auch der Rückgriff auf die Kohlevorräte erscheint nicht sehr aussichtsreich. Wie aus Abb. 2 ersichtlich, bleibt die Produktion bereits in den nächsten Jahrzehnten deutlich hinter dem Bedarf zurück. Die Produktion wird etwa um das Jahr 2100 ein Maximum durchlaufen.

Aus der geschilderten Situation ist klar, daß eine völlige Umschichtung der Bedarfsdeckung schon in den allernächsten Jahrzehnten notwendig sein wird. Dies kann nach aller vernünftigen Voraussicht weltweit gesehen nur durch eine intensive Nutzung der Kernenergie geschehen. Der große Bedarf an leicht transportablen und konzentrierten Energiespendern, der jetzt durch Erdölprodukte gedeckt wird, wird vermutlich auf Wasserstoff umgestellt werden müssen, der seinerseits auf elektrolytischem Wege (eventuell auch durch Hochtemperaturspaltung von Wasser) aus Kernenergiequellen erzeugt werden wird.

Hinsichtlich der Energievorräte zur Bedeckung des genannten Bedarfs muß zwischen verbrauchbaren und kontinuierlichen Energiequellen unterschieden werden. Unter verbrauchbaren Energiequellen werden Brennstoffe aller Art verstanden, von denen ein gewisser Vorrat vorhanden ist, die sich nach ihrer Verwendung in keinem nennenswerten Maß mehr Neubilden. Kontinuierliche Energiequellen sind etwa Sonnenenergie, Wasserkraft etc., die ständig neu zur Verfügung stehen, und bei denen das Pro-

blem der Nutzung im Aufwand für eine ökonomische Erschließung dieser Quellen liegt.

Verbrauchbare Energiequellen

Die Vorräte an allen fossilen Brennstoffen, wobei die Kohle ca. 90 % der Reserven ausmacht, beträgt $(1-6) \cdot 10^{16}$ kWh. Die relativ große Unsicherheit dieser Angabe geht auf die Unterschiede zurück, welche Gesteinskosten noch für vertretbar gehalten werden und wie groß derzeit noch unbekannte Vorkommen eingeschätzt werden.

Benützt man Uran nach der derzeit vorherrschenden Technologie, die es gestattet, etwa 0,5 % des vorhandenen Urans zur Energieproduktion heranzuziehen, so entsprechen die Reserven $(2-8) \cdot 10^{16}$ kWh. Sie liegen also zwar über den fossilen Reserven, jedoch nicht um einen wesentlichen Faktor. Gänzlich ändert sich das Bild, wenn man Brutreaktoren in Betracht zieht, deren erste Versuchstypen jetzt in Erprobung sind. Bei diesen wird das gesamte vorhandene Uran und Thorium der Energieerzeugung zugeführt. Selbst wenn man mit 50 %igen Gesamtverlusten bei mehrfacher Rückgewinnung rechnet, entsprechen die Uran- und Thoriumvorräte dann einer Energiereserve von wenigstens $(2-14) \cdot 10^{18}$ kWh.

Die zweite Art der Nutzung der Kernenergie stellt die Kernfusion dar. Sobald sie technologisch und ökonomisch realisierbar geworden ist, wird ein praktisch unerschöpflicher Energievorrat in Form

des im Meer enthaltenen Deuteriums vorhanden sein. 1 % des im Meer enthaltenen Deuteriums repräsentieren einen Energiegehalt von rund 10^{22} kWh.

Vergleicht man die Voraussagen für den Energiebedarf der nächsten 130 Jahre mit diesen Zahlen und zieht vor allem die baldige Erschöpfung der jetzt so intensiv benützten Erdöl- und Erdgasvorkommen in Betracht, so kommt man zwangsweise zu dem Schluß, daß nur die Nutzung der Kernenergie eine Aussicht bietet, den Bedarf der Menschheit für diese Zeit und darüberhinaus sicherzustellen. Daher erscheinen einige Bemerkungen zur Nutzung der Kernenergie und ihrer zukünftigen Möglichkeiten angebracht.

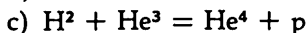
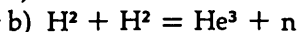
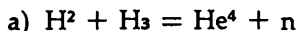
Das derzeit fast ausschließlich benutzte Uranisotop U^{235} kommt in der Natur mit einer Häufigkeit von 0,7 % vor. Beim Spaltungsvorgang entstehen jedoch pro Spaltung ca. 2,5 Neutronen, von denen nur eines zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benützt wird. Ein Teil der überschüssigen Neutronen wird in dem häufigeren Uranisotop U^{238} eingefangen und erzeugt dabei über Zwischenstufen das ebenfalls spaltbare Pu^{239} . Durch geeignete Bauweise der Reaktoren ist es möglich, sogar mehr als 1 Neutron pro Spaltung für die Konversion von U^{238} in Pu^{239} zu benützen. (In ähnlicher Weise ist es möglich, aus Th^{232} im Reaktor das spaltbare U^{233} herzustellen.) Diese als Brüter bezeichneten Reaktortypen werden es erlauben, praktisch das gan-

ze vorhandene Uran und Thorium in spaltbare Isotope überzuführen und damit der Energieerzeugung nutzbar zu machen. Da diese Reaktortypen noch in Entwicklung sind, erscheint für die nächsten 10 bis 15 Jahre eine Zwischenlösung als aussichtsreich: wenn man in vorhandene Reaktoren, z. B. der Druckwassertype, Brennelemente einsetzt, die teils aus hochangereichertem U^{235} , teils aus natürlichem Uran oder Thorium bestehen, so läßt sich schon eine relativ günstige Nacherzeugung von spaltbarem Material erreichen, die eine Nutzung der vorhandenen Kernbrennstoffe im Bereich zwischen 10 und 20 % ermöglicht.

Hinsichtlich der verfügbaren Vorräte hat die Verwendung von Brutreaktoren auch eine sehr wichtige Bedeutung. Fast die gesamten Kosten für die Brennelemente entfallen bei diesen Reaktoren auf chemische Wiederaufbereitung gebrauchter Brennelemente und metallurgisch-mechanische Herstellung neuer Brennelemente. Das bedeutet, die Kosten des ursprünglich gewonnenen Uran- oder Thoriumerzes spielen eine sehr untergeordnete Rolle für die Gesamtkosten, so daß auch sehr „arme“ Vorkommen ökonomisch erschlossen werden können, z. B. Gesteine mit etwa 60 ppm Urangehalt oder der Urangehalt des Meerwassers. Gesteigungskosten von etwa S 5.000,—/kg U_3O_8 erscheinen damit durchaus ökonomisch tragbar und würden dazu führen, daß die oben genannten Reserven an Kernbrennstoffen sich um einen Faktor von ca. 100 erhöhen.

Bezüglich der Kernfusion sind nachstehend die drei

wichtigsten in Frage kommenden Kernreaktionen aufgeschrieben:



Die Realisierung hängt von dem äußerst schwierigen technischen Problem ab, Temperaturen der Größenordnung 10^8 °K kontinuierlich oder kurzzeitig und periodisch zu realisieren. Reaktion a) hätte den Vorteil, bei der „niedrigsten“ Temperatur von $5 \cdot 10^7$ °K abzulaufen. Das benötigte Tritium (H^3) kann aber in ausreichender Menge nur durch Neutroneneinfang in Li^6 gewonnen werden ($Li^6 + n = He^4 + H^3$), das als Mantel und Neutroneneinfänger in der Umgebung des Fusionsvolumens untergebracht werden muß. Das Vorhandensein von Li in der Erdoberfläche ist aber nicht sehr reichlich, so daß der gesamten Energieproduktion auf Grund von Reaktion a) hiedurch gewisse Grenzen gesetzt sind.

Reaktion c) benötigt als Ausgangsmaterial He^3 , das seinerseits in wirtschaftlich bedeutenden Mengen nur auf Grund der Reaktion b) verfügbar gemacht werden kann. Es folgt somit, daß die für die sehr langfristige Entwicklung wichtigste Kernreaktion die nur auf Deuterium basierende Reaktion b) darstellt. Die kritische Temperatur für diese Reaktion beträgt $3 \cdot 10^8$ °K. Obwohl auf viele Jahrhunderte gesehen die Möglichkeit einer Energieversorgung durch Kernfusion sicher eine ernstzunehmende Möglichkeit ist, bin ich der Meinung, daß bis zum Zeitpunkt des ersten Demonstrationskraftwerkes

auf Fusionsbasis (2000—2050) die Brutreaktoren bereits technologisch so fortgeschritten sein werden und auf so lange Zeit eine Energieversorgung sichern, daß die Fusion einfach aus Gründen der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit im hier betrachteten Zeitraum nicht in größerem Umfang zur Realisierung kommen wird.

Kontinuierliche Energiequellen

Die von der Erdoberfläche absorbierte Sonnenwärme entspricht einem Energiebetrag von $7 \cdot 10^{17}$ kWh Jahr. Die Problematik der Umsetzung dieser riesigen Energiemengen z. B. in elektrische Energie liegt in den benötigten großen Flächen für die Speisung eines Kraftwerkes. In nähere Betrachtung kommen Wüstenzonen unterhalb 35° geographischer Breite, wo im Jahresdurchschnitt rund 200 W/m^2 (auf eine horizontale Fläche) eingestrahlt werden. Nimmt man für den Konversionsfaktor (z. B. photoelektrische Zellen) einen Richtwert von 10 % an und weiters, daß 30 % der Flächen für Service und andere Zwecke unbenutzt bleiben muß, dann kommt man auf eine Größenordnung von 70 km^2 für eine Kraftstation, die eine Durchschnittsleistung von 1000 MW elektrischer Energie liefert. Ein solches Kraftwerk könnte fast 10^{10} kWh pro Jahr liefern. woraus man sieht, daß einige tausend solcher Stationen einen durchaus wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung der Welt auch in Zukunft liefern können. Die Installationskosten solcher Anlagen sind jedoch außerordentlich hoch und müssen

letzten Endes auf die Stromkosten umgelegt werden. Es ist aber sicher, daß Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Sonnenenergiekonversion eine sehr große Bedeutung in der Zukunft haben werden, vor allem für die in dieser Hinsicht klimatisch günstig gelegenen Länder.

Die Wasserkraft, die wir in Österreich, wo 1971 21 % der gesamten Energie und 64 % des Stromes aus Wasserkraft erzeugt wurden, leicht zu überschätzen geneigt sind, ist weltweit gesehen vor allem für den zukünftigen Bedarf weniger bedeutend. Die als ausbaumöglich betrachteten Reserven betragen $\sim 3 \cdot 10^{13}$ kWh/Jahr. Derzeit sind etwa 10 % davon ausgebaut, die im Jahr 1971 rund 5 % des Energieweltbedarfs lieferten. In Österreich waren 1971 5700 MW Kraftstationen installiert und es wird geschätzt, daß dies etwa die Hälfte der ausbaufähigen Reserven darstellt. Die Verdoppelung des Stromverbrauches pro 10 Jahre würde es erforderlich machen, diesen Ausbau in den nächsten 10 Jahren auch tatsächlich zu realisieren. Dem steht in den letzten 5 Jahren ein tatsächlicher Neubau von 300 MW pro Jahr gegenüber. Man sieht, daß auch in einem wasserkraftmäßig relativ günstig gelegenen Land die Zuwendung zu anderen Energiereserven dringend nötig ist. Nach meiner Meinung ist Österreich bezüglich Bau und Planung von Kernkraftwerken sogar schon in Verzug geraten.

Die Nutzung von Gezeitenenergie (Reserve $\sim 10^{12}$ kWh/Jahr), Windenergie (Reserve etwa ebenso groß) spielt wegen des kleinen Gesamtbetrages für

die Weltversorgung keine Rolle, obwohl in begünstigten Gebieten ein Ausbau durchaus sinnvoll sein wird.

Die Erdwärme stellt einen relativ großen Energiefluß von $3 \cdot 10^{14}$ kWh pro Jahr dar, ist jedoch wegen ihrer weiten Verteilung nur an jenen Stellen technisch sinnvoll faßbar, wo z. B. heiße Quellen direkt zum Kraftwerksbetrieb herangezogen werden können. Dieser Anteil liegt in der Größenordnung von 1 % des obigen Betrages. In Ländern mit entsprechend geographischen Möglichkeiten ist diese Form der Energiegewinnung in sehr schnellem Ausbau begriffen.

In seiner Bedeutung noch unklar erscheint die Möglichkeit, die in der Erdkruste bis etwa 3,5 km Tiefe gespeicherte Wärme als aufbrauchbare Energie nutzbar zu machen. Sie wird auf 10^{17} kWh geschätzt und stellt daher ein sehr beachtliches Reservoir dar. Interessant sind vermutlich nur die in der Nähe von Vulkanen gespeicherten Energiemengen, die auf etwa $5 \cdot 10^{15}$ kWh geschätzt werden. Ihre Erschließung ist technologisch noch im Anfangsstadium.

Die gesamte Energiesituation, Jahresverbrauch und Reserven, sind in Abb. 3 zusammengefaßt. Der Vergleich der Zahlen zeigt deutlich, daß für die zukünftige Entwicklung weltweit gesehen nur die Kernenergie ausreichende Möglichkeiten zur Bedeckung des Bedarfs bietet, bzw. in geographisch günstigen Gegenden eine direkte Konversion der Sonnenenergie.

Konklusionen und Zukunftsaspekte

Die Zukunft der Energieversorgung ist durch einen eigenartigen Widerspruch gekennzeichnet: Einerseits zeigt Abb. 3, daß vor allem mit Rücksicht auf die enormen nuklearen Reserven die Vorratssituation auf Jahrtausende beruhigend ist. Diese Energiereserven lassen sogar hoffen, daß mit ihrer Hilfe kritische Engpässe auf dem Sektor anderer Rohstoffe und der Lebensmittel langfristig entschei-

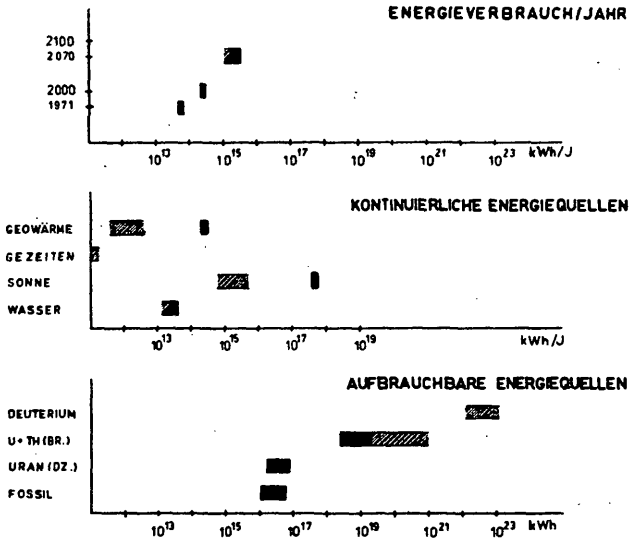


Abb. 3: Energieverbrauchs- und Vorratsschätzungen. Die Breiten zeigen die Unsicherheitsgrenzen an, die schraffierten Bereiche besonders schwer abschätzbare Werte. Bei Geowärme und Sonnenenergie bezeichnen die Striche die gesamten Energiebeträge, die schraffierten Zonen geben Schätzungen über mögliche Nutzung an.

dend gemildert werden können. Andererseits treten gerade auf dem Gebiet der Energieversorgung — vor allem bei Treibstoffen — akute Verknappungen auf und werden sich voraussichtlich in nächster Zeit noch wesentlich verschärfen.

Der Grund ist Mangel vorausschauender Planung und Maßnahmen sowohl auf nationaler wie weltweiter Ebene. Weitgehende Veränderungen auf dem Energiesektor sind in nächster Zukunft erforderlich und ihre Vorbereitung ist überfällig. Die verspätete und noch immer nicht allgemeine Einsicht in diese Tatsache ist der eigentliche Grund der beginnenden Umstellungskrise. Die momentane Preisgünstigkeit von Erdöl und Erdgas, die zu dem enormen Anstieg ihres Anteils am Weltenergieverbrauch geführt hat, hätte nicht dazu verleiten dürfen, ihre absehbare Erschöpfbarkeit außer acht zu lassen. Intensive von Staat und Industrie geförderte Forschung und Entwicklung etwa auf den Gebieten Wasserstoffantriebe und -erzeugung, Brennstoffzellen, direkte Konversion etc. müßten lange weit fortgeschritten sein. Obwohl hier schon vieles im Prinzip gelöst erscheint, der Weg zu einer ökonomischen Massenproduktion ist lang und setzt jahrelange Erprobungs- und Anlaufzeiten voraus.

Äußerst kurzsichtig ist das Zögern in der Anwendung und Fortentwicklung der nuklearen Energiequellen vor allem des Brutreaktors. Seit etwa zwei Jahrzehnten sind Schätzungen über die Uran- und

Thoriumvorräte bekannt, die zeigen, daß nur der Brüter das Problem der Energievorräte auf lange Frist und innerhalb einer sinnvollen Entwicklungsdauer lösen kann. Trotzdem erhielt z. B. in den USA erst 1966 diese Entwicklungsrichtung Priorität. Daß eine Institution wie Euratom kaum noch existiert, weil nationale Interessen der Mitgliedsstaaten alle technisch und wirtschaftlich interessanten Entwicklungen sich selbst vorbehalten, ist für das kleinräumige und kurzsichtige Denken auch in den EG-Staaten kennzeichnend. Dabei erfordert die voraussehbare Entwicklung der Energiewirtschaft nicht irgendwelche Formen der Zusammenarbeit, sondern echte Gemeinschaftsprojektierung und Realisierung in einem europäischen Großraum. Auch Österreich, das sich verspätet und halbherzig auf das Gebiet der Kernenergienutzung begeben hat, hält viel zu konservativ an Wasserkraftprojekten fest und hat noch keinen entscheidenden Schritt zur Abwendung der Energiekrise innerhalb der eigenen Wirkungsmöglichkeiten getan.

Um Energiemengen verfügbar zu machen, wie sie in 100 Jahren erforderlich sein dürften, $(2-3) \cdot 10^{15}$ kWh/Jahr, muß im ganzen gesehen sicher die Kernenergie in Form von Brutreaktionen den größten Anteil liefern. Zwei Faktoren müssen bei der Realisierung einer Nuklearindustrie solchen Umfangs vor allem bedacht werden: 1. Etwa 60 % der erzeugten Energie wird auf Grund des Wirkungsgrades thermischer Kraftwerke an die Umgebung abgegeben. 2. Riesige Mengen hochradioaktiver

Brennelemente sollten zur chemischen Aufbereitung nur minimale Wege zurücklegen. Verlangt der zweite Punkt eine örtliche Konzentration einer ausreichenden Zahl von Reaktoren um ein chemisches Aufbereitungswerk, so erfordert der erste Punkt zur Vermeidung lokaler Klimastörungen, daß eine solche massierte Wärmeabgabe womöglich an der Meeresküste, eventuell auf künstlichen Inseln vor dieser erfolgt. Denn nur das Meer stellt eine hinreichend effektive Wärmesenke für diese Zwecke dar.

Ein mögliches Konzept zur Realisierung solcher Anlagen sieht die Errichtung von „Energie-Parks“ in Küstennähe vor, in denen z. B. acht Reaktoren mit einer elektrischen Leistung von je 5000 MW mit Aufbereitungs- und sonstigen Hilfsanlagen zusammengefaßt sind. Wenn die oben genannte Schätzung für 2070 nur auf nuklearer Basis gedeckt werden soll, werden dann rund dreitausend solcher Energieparks für den Weltbedarf benötigt. Dann müßten bis dahin im Jahresdurchschnitt 240 5000 MW-Reaktoren installiert werden! Außerdem müßten bei einer Reaktorlebensdauer von 30 Jahren 800 Reaktoren pro Jahr durch neue ersetzt werden. Man mag an solchen Schätzungen um einen Faktor 2 oder 3 zweifeln — auf Grund geänderter Annahmen über Bevölkerungsentwicklung, Prokopf-Verbrauch, Großnutzung der Sonnenenergie etc. — am Faktum einer unerhörten technischen Anstrengung zur Bewältigung dieser Erfordernisse ändert sich nichts Entscheidendes.

Sofort stellt sich die Frage der Auswirkungen und Begrenzungen einer Weltenergieproduktion dieses Ausmaßes. Der wesentlichste Begrenzungsfaktor erscheint die Gesamterwärmung der Erdoberfläche zu sein. Verglichen mit der Sonnenerwärmung macht sie bei obigen Annahmen 0,3 % aus. Nach vorliegenden Berechnungen sollte daraus eine durchschnittliche Erwärmung von sicher weniger als 0,5 °C resultieren. Dies erscheint akzeptabel, doch darf nicht vergessen werden, daß die Energieabgabe auch bei bester Planung keinesfalls gleichmäßig erfolgen kann, und auch die Wettererscheinungen nur durch einen Bruchteil der eingestrahlten Sonnenenergie in Gang gehalten werden. Wo liegen also die Grenzen, die noch tragbar sind, ohne unser Wettergeschehen entscheidend zu verändern? Obwohl hier noch wesentlich eingehendere Studien nötig sein werden, ergeben derzeit vorliegende Computersimulationen, daß die aus der Energieproduktion resultierenden meteorologischen Veränderungen von etwa derselben Größenordnung sind wie die normalerweise auftretenden Schwankungen der Wetterbedingungen. Dies zeigt aber andererseits wieder, daß es nicht möglich erscheint, die angenommene Energieproduktion um eine weitere Größenordnung zu steigern, ohne gravierende meteorologische Konsequenzen hervorzurufen. Diese meteorologische Limitation durch die Abfallwärme erscheint auf lange Sicht schwerwiegender als alle im Prinzip reduzierbaren Umwelteinflüsse von Seiten der Energieversorgung.

Die Frage der lokalklimatischen Effekte in Ballungsräumen ist bereits heute schwierig genug um klar zu machen, daß das Zusammenwachsen immer größerer Stadtflächen durch umfassende Planungsmaßnahmen vermieden werden müßte. Energieversorgungsanlagen aber müssen wegen der mit ihnen lokal verknüpften Abfallwärme trotz der Leitungsverluste so weit distanziert werden, daß sie zum Lokalklima von Großsiedlungen nicht beitragen.

Die vielzitierte Beseitigung langlebigen radioaktiven Abfalls erscheint demgegenüber ein lösbares Problem zu sein. Eine Jahresproduktion von $5 \cdot 10^5$ MCi, wie sie der Erzeugung obiger Energiemenge durch Kernspaltung entspricht, kann in Keramik gebunden in Salzlagerstätten von etwa 80 km^2 sicher abgelagert werden. Da größenordnungsmäßig 10^5 bis 10^6 mal größere Salzlagerflächen vorhanden sind, liegt hier bei sachgemäßer Handhabung keine ernste Begrenzung vor. Edelgase und Tritium allerdings müßten bis zum weitgehenden Zerfall gespeichert werden.

Die Strahlungsbelastung des Menschen muß durch den Großeinsatz von Kernkraftwerken keineswegs zum biologischen Problem werden. Reaktor-Containment und Strahlenschutz können zweifellos so weit getrieben werden, daß die natürliche Strahlungsbelastung nicht nennenswert erhöht wird. Dies ist nur eine Frage sachkundig erstellter Vorschriften und Kontrollen und damit gewisser Mehrkosten. Mit entsprechenden Vollmachten ausgestattete übernationale Überwachungsorgane werden al-

lerdings nötig sein, um für die Einhaltung dieses Sicherheitsstandards zu sorgen.

Die Konzentration von Kraftwerken in Energieparks nahe der Küste und ihre notwendige Distanzierung von Ballungsräumen machen das Energietransportproblem besonders akut. Die forcierte Entwicklung z. B. wirtschaftlich arbeitender supraleitender Stromkabel erscheint hier ebenso wichtig wie der Energietransport in Wasserstoff-Pipelines vom Erzeugungs- zum Nutzungsort. Schätzungen zeigen, daß elektrischer Energietransport mit herkömmlicher Technologie und Wasserstofftransport in ähnlichen Systemen wie den heutigen Erdgasleitungen zu vergleichbaren Energiekosten am Verbrauchsort führen.

Die meteorologischen Begrenzungen und die enormen technischen Anstrengungen, die auf dem Energiesektor für die nächsten 100 Jahre voraussehbar sind, verlangen jedoch kategorisch auch vom Menschen gesetzte Limitationen: Vor allem eine weltweit effektive Geburtenkontrolle und die Vermeidung von Energievergeudung in hochtechnisierten Gebieten.

Alle Energieprobleme erscheinen daher lösbar, doch erfordern sie radikale Umstellungen in naher Zukunft und als Vorbereitung darauf intensivste Forschung und Entwicklung auf den einschlägigen Gebieten. Unerläßlich ist die großräumige Planung der Energiewirtschaft, die in steigendem Maß die Grundindustrie der menschlichen Zukunft sein wird.

Literatur

- Cook, E., The flow of energy in an industrial society, *Scient. American*, 225/3, 134, 1971
- Gregory, D. P., The hydrogen economy, *Scient. American*, 228/1, 13, 1973
- Hubbert, K., The energy resources of the earth, *Scient. American*, 225/3, 60, 1971
- Mandel, H., Resources of primary energy, 3. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 49/P/359, 1971
- Meadows, D., The limits to growth, Universe Books (New York Pontomac Associates Inc., Washington D. C.) 1972
- Österr. Statist. Zentralamt, Statistisches Jahrbuch 1972
- Post, R. F., Prospects for fusion power, *Physics Today* 1973/4, p. 30.
- Starr, Ch., Energy and Power, *Scient. American*, 225/3, 36, 1971
- Summers, C. M., The conversion of energy, *Scient. American* 225/3, 148, 1971
- UN Statistical Yearbook 1971
- UN Resources and Transport Div., World energy requirements and resources in the year 2000, 3. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 49/P/420, 1971