# 1. Brauchen wir Kernenergie?

## Versuch einer systemanalytischen Antwort

D. Oesterwind, A. Voß
Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung
der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

### 1.1. Einleitung

Im Mittelpunkt der folgenden Uberlegungen stehen nicht Erläuterungen zu einzelnen Energietechnologien oder gar statistische Einzelheiten über die Entwicklung des Energieverbrauchs. Vielmehr soll im Rahmen einer Darstellung heutiger Probleme der Energieversorgung, ihrer Ursachen und der sich abzeichnenden Entwicklungsperspektiven ein Versuch unternommen werden, der Beantwortung der Frage „Brauchen wir die Kernenergie?" ein Stück näher zu kommen. Die Vielzahl der dabei zu beachtenden Faktoren und ihre gegenseitige Beeinflussung erfordern im Rahmen des zur Verfügung stehenden Umfangs eine Beschränkung auf das Wesentliche. Dabei dürfen aber der innere Zusammenhang und die Verkettung der einzelnen Probleme nicht verlorengehen, denn die heute anstehenden Aufgaben der Energieversorgung können nur im Rahmen einer über eine technische und wirtschaftliche Betrachtung hinausgehenden Analyse gelöst werden. Energieprobleme und damit verbunden auch die Frage nach dem Einsatz der Kernenergie sind, wie im weiteren gezeigt werden soll, Systemprobleme; darunter sind Problemkomplexe zu verstehen, die über die Bereiche einzelner Wissenschaftsdisziplinen hinausgehen, so z. B. die Verknüpfung von Energieverbrauch, Umweltbelastung, Ressourcenverknappung und wirtschaftlicher Entwicklung. Deshalb soll versucht werden, die Energieprobleme von einem systemanalytischen Standpunkt aus anzugehen.

Die Entwicklung der friedlichen Nutzung der Kernenergie mit ihrem Beginn in der Mitte der vierziger Jahre war überwiegend getragen von dem Gedanken einer wissenschaftlichen und technischen Herausforderung. Auf die militärischen Aspekte soll hier nicht eingegangen werden. Später trat dann das Motiv der kostengünstigeren Energieerzeugung in den Vordergrund. Seit einigen Jahren hat sich die Situation aber grundlegend geändert. Die sich abzeichnende Verknappung der fossilen Energieträger, speziell des Erdöls und Erdgases, verlieh dem Aspekt der ausreichenden mengenmäßigen Verfügbarkeit von Energie zusätzliche Bedeutung. Die politisch motivierte Preis- und Verknappungspolitik der Ölförderländer verdeutlichte dann auch einer breiten Öffentlichkeit die Abhängigkeit einer modernen Industriegesellschaft von einer funktionierenden Energieversorgung und rückte unversehens die Frage der nationalen Versorgungssicherheit – oder anders ausgedrückt: die Reduzierung unserer Abhängigkeit vom Erdöl – in den Mittelpunkt des energiepolitischen Interesses. Parallel zu der sich schon seit Jahren abzeichnenden Ressourcenknappheit, die durch die exponentielle Zunahme des Energieverbrauchs und der industriellen Produktion in der Vergangenheit verursacht wurde, wurden die mit diesem Wachstum verbundenen

ökologischen Probleme zu einem Thema von zentraler Bedeutung für die Energieversorgung. In jüngster Zeit sind nun auch verstärkt sozial- und gesellschaftspolitische Aspekte in die Energiedebatte eingeflossen. Zwei Entwicklungen erscheinen in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung: Einmal die sehr intensiven Diskussionen über die Grenzen des materiellen Wachstums, die sicher nicht von den Energieplanern unreflektiert beiseite geschoben werden können, und zum anderen die zunehmend kritische Einstellung der Öffentlichkeit in bezug auf die mit neuen Technologien verbundenen Risiken und ihre Akzeptierung. Gerade der letzte Punkt ist ja stark mit der friedlichen Nutzung der Kernenergie verknüpft. All dies macht deutlich, daß sich die Umgebung, in der sich die Entwicklung neuer Energietechnologien im allgemeinen und der Kernenergie im speziellen heute vollzieht, grundlegend verändert hat; neue Sachzwänge, wie Umweltfreundlichkeit, Versorgungssicherheit, Risiko-Nutzen-Verhältnis, sind hinzugetreten, die entscheidenden Einfluß auf die technologischen Entwicklungen haben.

In dieser Situation ist es durchaus legitim, wenn nicht sogar eine politische Notwendigkeit, die Entscheidung für den Einsatz der Kernenergie noch einmal kritisch zu hinterfragen:

Die folgenden Fragen sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung:

- Brauchen wir mehr Energie?
- Gibt es Alternativen zur Kernenergie?
- Welche Nebeneffekte bringt die Nutzung der langfristigen Energieversorgungsalternativen in großem Umfang?

## 1.2. Brauchen wir mehr Energie?

Energie wird definiert als die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Die Mengen und Arten der Energien, die dem Menschen zur Verfügung standen, haben seine Lebensweise und seine Leistungen zu allen Zeiten entscheidend mitbestimmt. Je mehr Energie er sich nutzbar machen konnte, desto größer waren seine Leistungen und sein Wohlstand. „Die Energie und die aus ihr fließenden Wohltaten Licht, Wärme, Nahrung und Kleidung zeigen sich als technische Umwelt, ohne die der Prothesengott Mensch nicht existieren kann. Die Umwelt ‚Natur', deren früherer Ungestörtheit wir heute nachtrauern, enthüllt sich dagegen bei schwindender Energieproduktion als Feind, als Quelle von Kälte, Hunger und Krankheit" [1]. Energie in ihren verschiedenen Erscheinungsformen ist somit ein wichtiges Hilfsmittel des Menschen zur Veränderung seiner Umwelt im Sinne einer Steigerung seiner Lebensqualität. Auf der anderen Seite bringt jeder Energieverbrauch auch unerwünschte Nebeneffekte mit sich. Es gilt also zwischen Nutzen und Schaden abzuwägen.

Abbildung 1 zeigt die Zunahme des Weltenergieverbrauchs, aufgegliedert nach den Primärenergieträgern Kohle, Erdöl, Gas, Kernenergie und Wasserkraft, beginnend im Jahre 1875 bis zum Jahre 1977. Der gesamte Energieverbrauch stieg während dieses Zeitraumes um mehr als das Dreißigfache an und beträgt heute ca. 9 Mrd. t SKE pro Jahr (1 t SKE entspricht dem Energieinhalt von 1 t Steinkohle). Die Steinkohle hat ihre dominierende Rolle als Hauptenergielieferant mit Beginn der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts an das Erdöl abtreten müssen. Erdöl und Erdgas decken heute 67% des Weltenergiebedarfs.

Die wesentlichen Gründe für dieses exponentielle Wachstum des Energieverbrauchs sind die Zunahme der Weltbevölkerung von 1,2 auf über 4 Mrd. Menschen und die industrielle Entwicklung. Wie eng die wirtschaftliche Entwicklung mit dem Energieverbrauch verknüpft

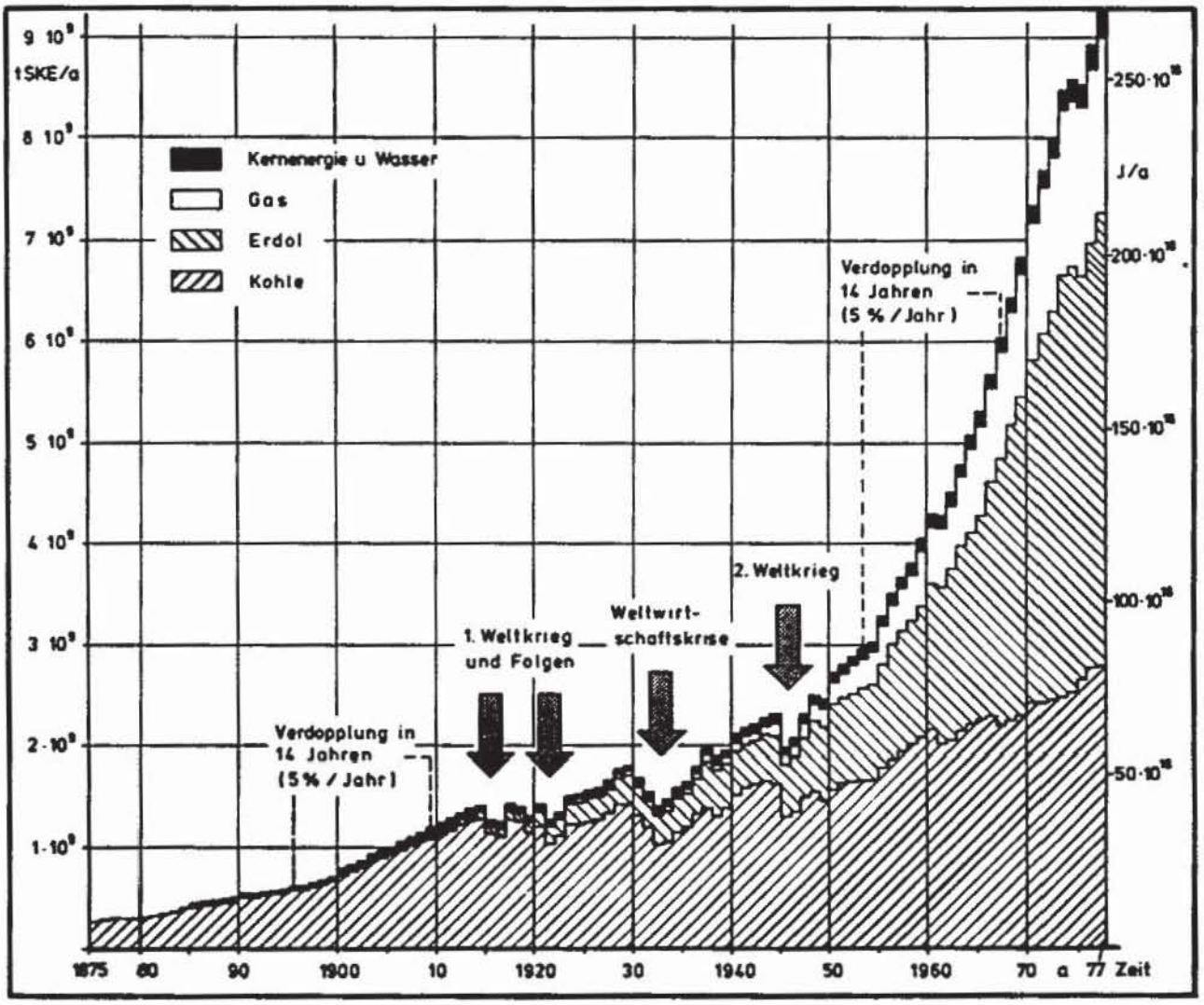



*Abbildung 1 Die Entwicklung des Weltenergieverbrauchs nach Energieträgern*

ist, zeigt Abbildung 2. Dargestellt ist hier für verschiedene Länder der Erde der Energieverbrauch pro Kopf in Abhängigkeit vom Bruttosozialprodukt pro Kopf. Dieses Bild weist aus, daß eine große Zahl von Ländern mit einem Pro-Kopf-Verbrauch kleiner als 2 t SKE/a auskommt und daß die Zahl der Länder mit einem Pro-Kopf-Verbrauch von mehr als 5 t SKE/a relativ klein ist. Zur Verdeutlichung dieser gewaltigen Unterschiede sind in Abbildung 3 noch einmal einige Zahlenwerte über den Pro-Kopf-Verbrauch einiger Länder zusammengestellt.

Der Pro-Kopf-Verbrauch der Amerikaner ist etwa 50 mal so groß wie der in Indien und mehr als doppelt so groß wie bei uns. Die Vereinigten Staaten tragen also etwa zu einem Drittel zum gesamten Weltenergiebedarf bei, obwohl sie nur einen Anteil von 6% an der Weltbevölkerung haben. Vergegenwärtigt man sich, daß der überwiegende Teil der Weltbevölkerung in den sogenannten Entwicklungsländern mit zum Teil sehr hohen Geburtenüberschüssen lebt, so vermitteln diese Zahlen ein Gefühl dafür, welche potentiellen Steigerungen im Weltenergieverbrauch noch möglich und zu erwarten sind, allein um den Nachholbedarf dieser Länder zu decken.

Wie aber ist die Situation in den Industrieländern, speziell in der Bundesrepublik Deutschland, zu beurteilen?

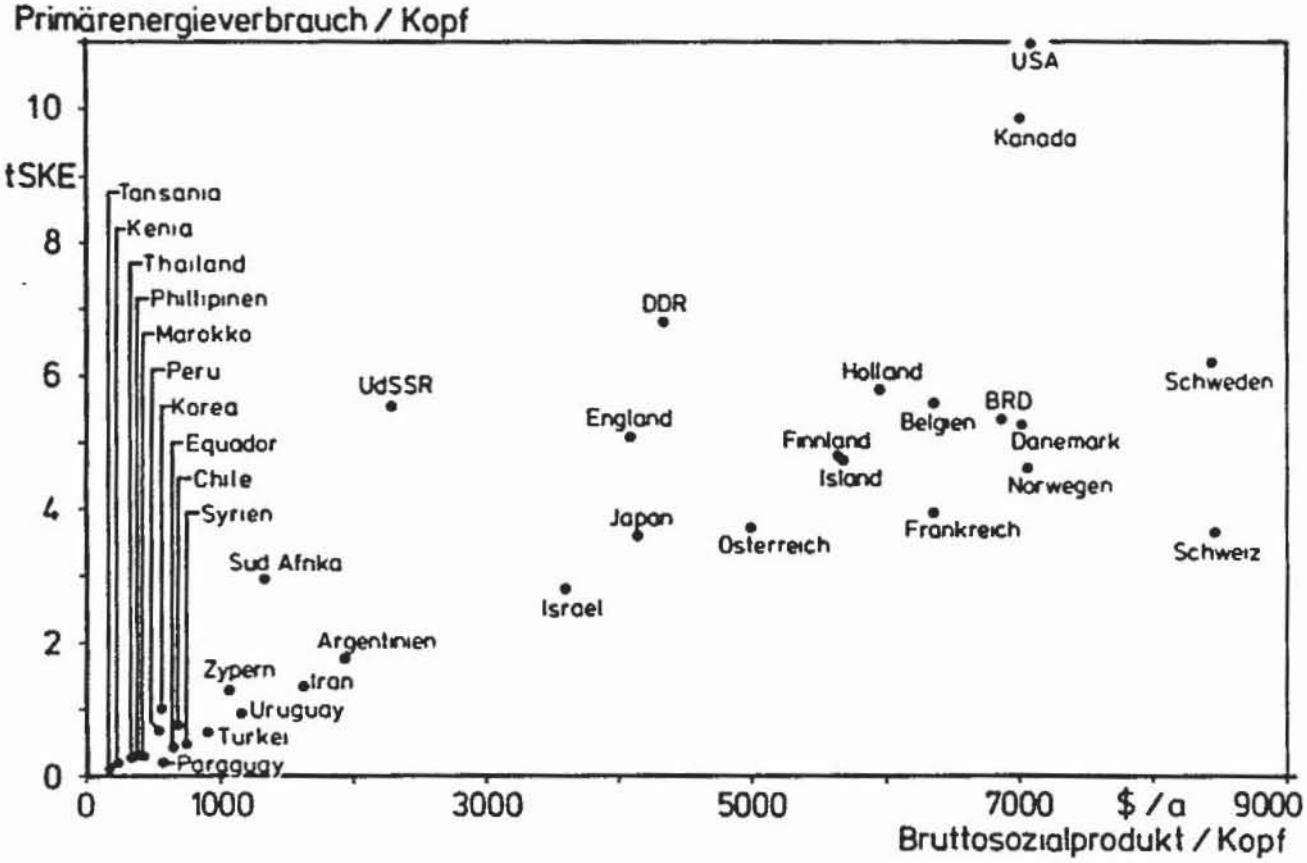



*Abbildung 2 Die Abhängigkeit des Primärenergieverbrauchs vom Bruttosozialprodukt 1975*

| Region | Primärenergieverbrauch in t SKE / Kopf · a |
|---|---|
| Weltdurchschnitt | 2,03 |
| Industrieländer | 6,2 |
| USA | 11,0 |
| BRD | 5,34 |
| Entwicklungslander | 0,29 |
| Indien | 0,22 |
| Brasilien | 0,67 |

*Abbildung 3 Energieverbrauch pro Kopf in verschiedenen Regionen im Jahre 1975*

Ist hier nicht mit einer baldigen Stagnation des Energieverbrauchs zu rechnen?

In Abbildung 4 ist die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland nach Energieträgern dargestellt. Der Energieverbrauch stieg von 135 Mio. t SKE im Jahre 1950 auf 370 Mio. t SKE im Jahre 1977, dies entspricht einer durchschnitt-

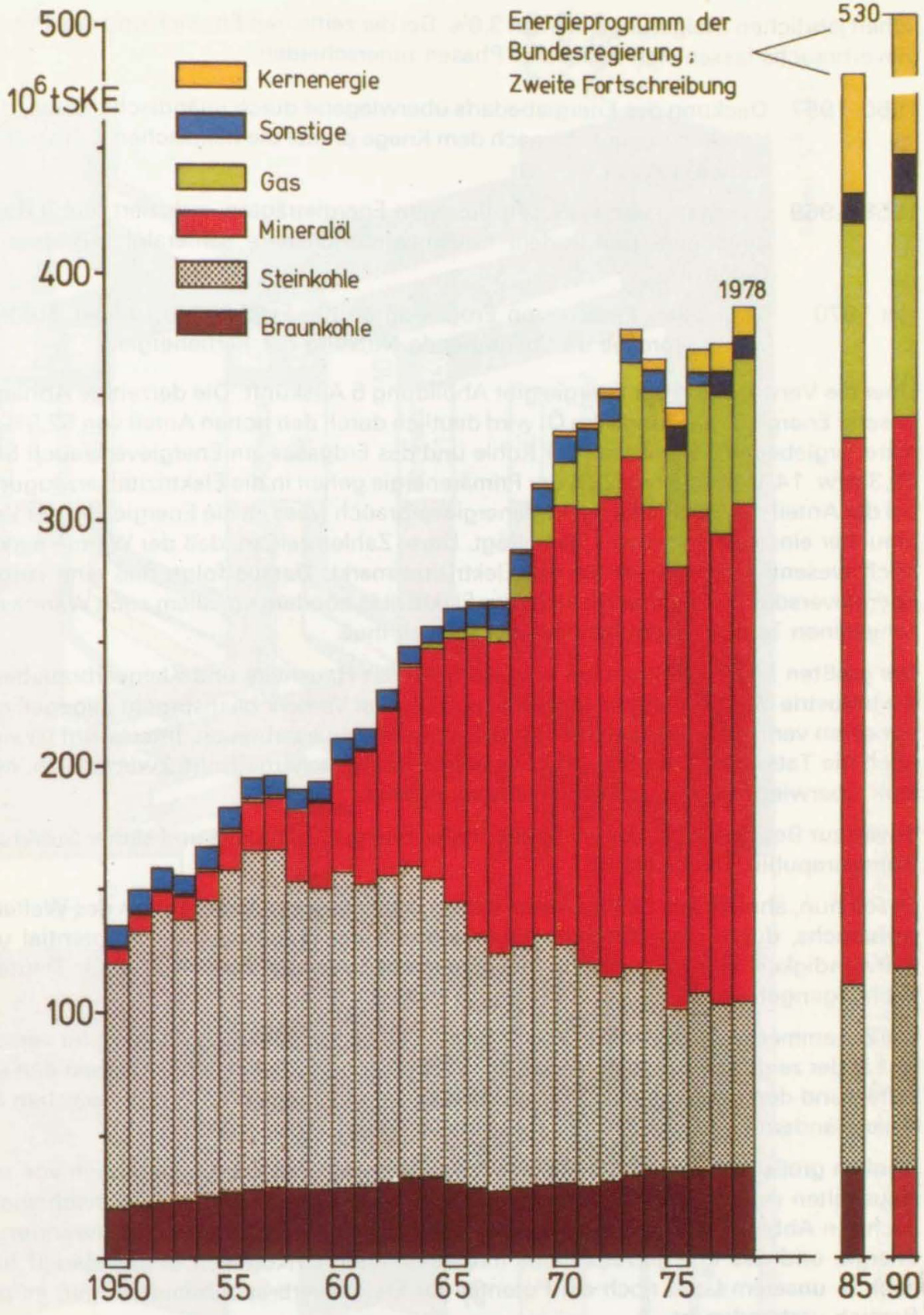



*Abbildung 4 Die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland bis 1990*

lichen jährlichen Steigerungsrate von 3,8%. Bei der zeitlichen Entwicklung des Primärenergieverbrauchs lassen sich dabei drei Phasen unterscheiden:

1950–1957 Deckung des Energiebedarfs überwiegend durch inländische Kohle, da in der Wiederaufbauphase nach dem Kriege primär die heimischen Steinkohlelagerstätten genutzt wurden.

1958–1969 Übergang von festen zu flüssigen Energieträgern, induziert durch das preisgünstigere und zudem nutzungsfreundlichere Mineralöl aus dem Nahen Osten.

seit 1970 Verstärkter Einsatz von Erdgas durch die Erschließung neuer Erdgasfelder in der Nordsee und beginnende Nutzung der Kernenergie.

Über die Verwendung der Energie gibt Abbildung 5 Auskunft. Die derzeitige Abhängigkeit unserer Energieversorgung vom Öl wird deutlich durch den hohen Anteil von 52,9% am Primärenergiebedarf. Die Anteile der Kohle und des Erdgases am Energieverbrauch betragen 29,3 bzw. 14,1%. Nur etwa 29% der Primärenergie gehen in die Elektrizitätserzeugung, wobei der Anteil der Elektrizität am Endenergieverbrauch (dies ist die Energie, die der Letztverbraucher einsetzt) nur etwa 13% beträgt. Diese Zahlen zeigen, daß der Wärmemarkt heute noch wesentlich größer ist als der Elektrizitätsmarkt. Daraus folgt, daß eine langfristige Energieversorgungsalternative nicht nur Elektrizität, sondern vor allem auch Wärme der verschiedenen Temperaturen bereitstellen können muß.

Die größten Energieverbraucher sind die Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher sowie die Industrie mit einem Anteil von 45 bzw. 35%. Der Verkehr beansprucht dagegen mit 20% nur einen verhältnismäßig kleinen Anteil am Endenergieverbrauch. Interessant ist vielleicht noch die Tatsache, daß etwa 11% des Erdöls für nichtenergetische Zwecke, d.h. als Rohstoff überwiegend in der Chemie verbraucht wird.

Soviel zur Beschreibung der Ist-Situation des Energieverbrauchs und seiner Struktur in der Bundesrepublik Deutschland.

Es soll nun, ähnlich wie bei der Abschätzung des Entwicklungspotentials des Weltenergieverbrauchs, durch eine Querschnittsbetrachtung der Frage nach dem Potential und der Notwendigkeit einer Steigerung des Energiebedarfs der Bundesrepublik Deutschland nachgegangen werden.

Die Zusammenstellung der Pro-Kopf-Verbräuche an Energie (Abbildung 3) für verschiedene Länder zeigt deutlich, daß hier nicht nur erhebliche Unterschiede zwischen den entwikkelten und den unterentwickelten Ländern bestehen, sondern daß auch zwischen den Industrieländern Unterschiede von mehr als 100% bestehen.

Ähnlich große Unterschiede stellt man fest, wenn man den Energieverbrauch von privaten Haushalten verschiedener Einkommensklassen in der Bundesrepublik Deutschland untersucht. In Abbildung 6 ist dies dargestellt. Die fast lineare Zunahme der Aufwendungen für Energie und des Energieverbrauchs mit steigendem Einkommen deutet darauf hin, daß auch in unserem Land noch ein Potential für Energieverbrauchssteigerungen im privaten Bereich vorhanden ist.

Da die privaten Haushalte über 80% ihrer Energie für die Raumheizung benötigen, liegt dieses Potential vor allem in der mit wachsendem Einkommen zunehmenden Wohnungsgröße, die einen höheren Raumwärmebedarf bedingt. Wirkt also die mit zunehmenden Einkommen zunehmende Wohnungsgröße tendenziell in Richtung auf einen Energiemehrverbrauch, so wird die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs aber auch noch durch

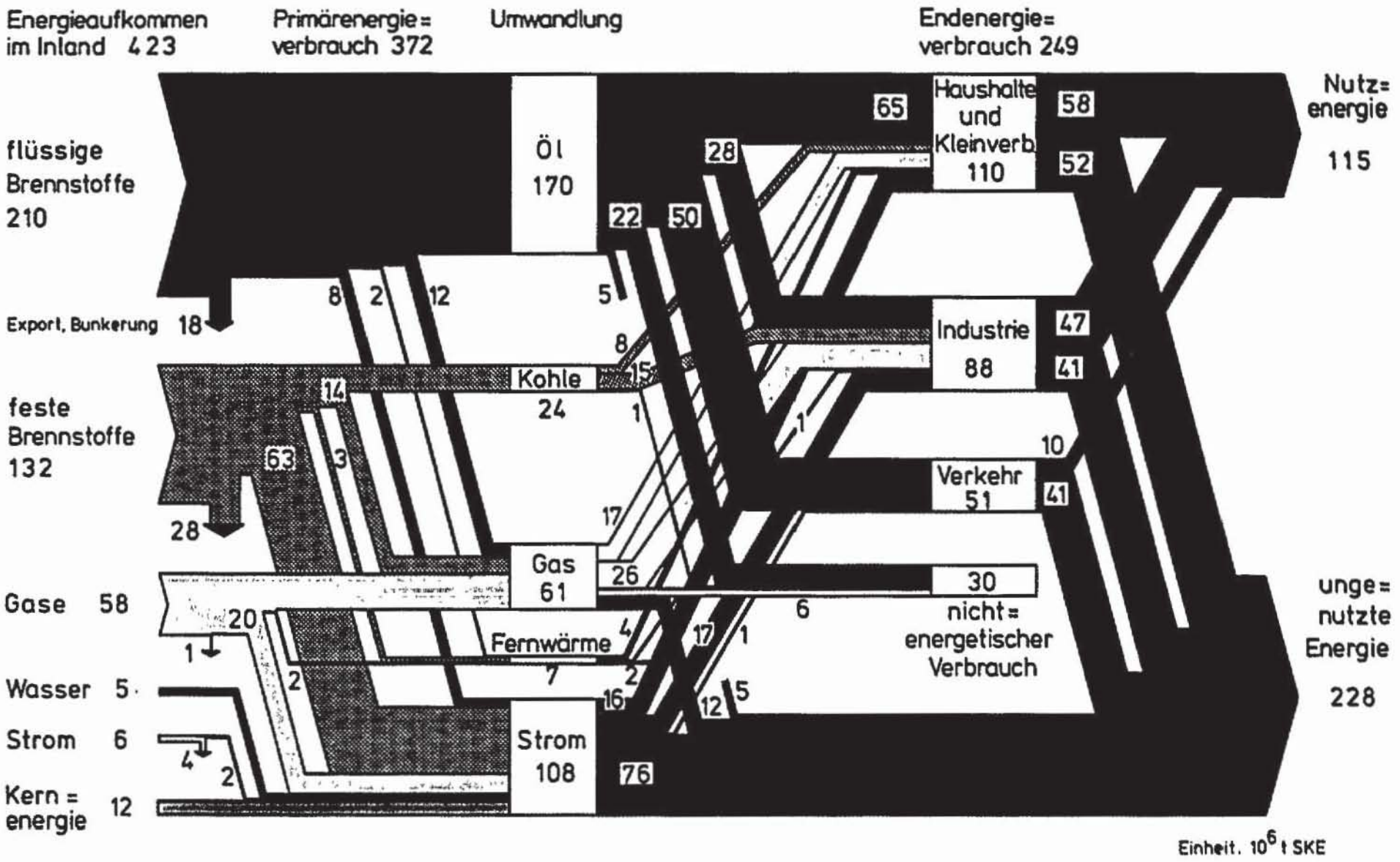



*Abbildung 5 Energieflußbild der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1977*

zwei weitere Faktoren mitbestimmt werden: die Bevölkerungsentwicklung und die Einführung von energiesparenden Maßnahmen. Die Wohnbevölkerung hat in unserem Lande seit 1950 von 50 Millionen auf heute 61,5 Millionen zugenommen. In den letzten Jahren war aber bereits ein leichter Rückgang der Bevölkerungszahl zu verzeichnen, und es wird angenommen, daß sich diese Entwicklung auch in der Zukunft fortsetzt, so daß im Jahre 2000 die Bevölkerungszahl auf etwa 56 Millionen zurückgegangen sein wird. Die Bevölkerungsentwicklung wird also in Zukunft nicht mehr zu einer Bedarfssteigerung im Energieverbrauch des privaten Bereichs beitragen. Tendenziell in Richtung auf eine Reduzierung des Energieverbrauchs wirken auch Energiesparmaßnahmen. Im privaten Bereich, wo der überwiegende Teil der Energie zur Raumheizung gebraucht wird, ist die bessere Isolierung der Gebäude die wichtigste Maßnahme zur Reduzierung des Wärmebedarfs. Die am 1. November 1977 in Kraft getretene neue Wärmedämmvorschrift für Neubauten führt zu einer Reduzierung des Raumheizwärmebedarfs um etwa 40% bei neuerstellten Wohnungen. Dies heißt aber nicht, daß der gesamte Raumwärmebedarf nun um etwa 40% zurückgeht, sondern der Einspareffekt wird nur langsam wirksam werden können, da heute bereits 80% des Gebäudebestandes des Jahres 2000 existieren. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Energieverbrauch im privaten Bereich in Zukunft zwar noch weiter steigen wird, daß aber die Zuwachsraten abnehmen werden [11].

In dem zweiten großen Energieverbrauchssektor unserer Volkswirtschaft – der Industrie, und hier insbesondere in der energieintensiven Grundstoffindustrie – war eine rationelle Energienutzung schon immer eine ökonomische Notwendigkeit. Obwohl auch hier noch

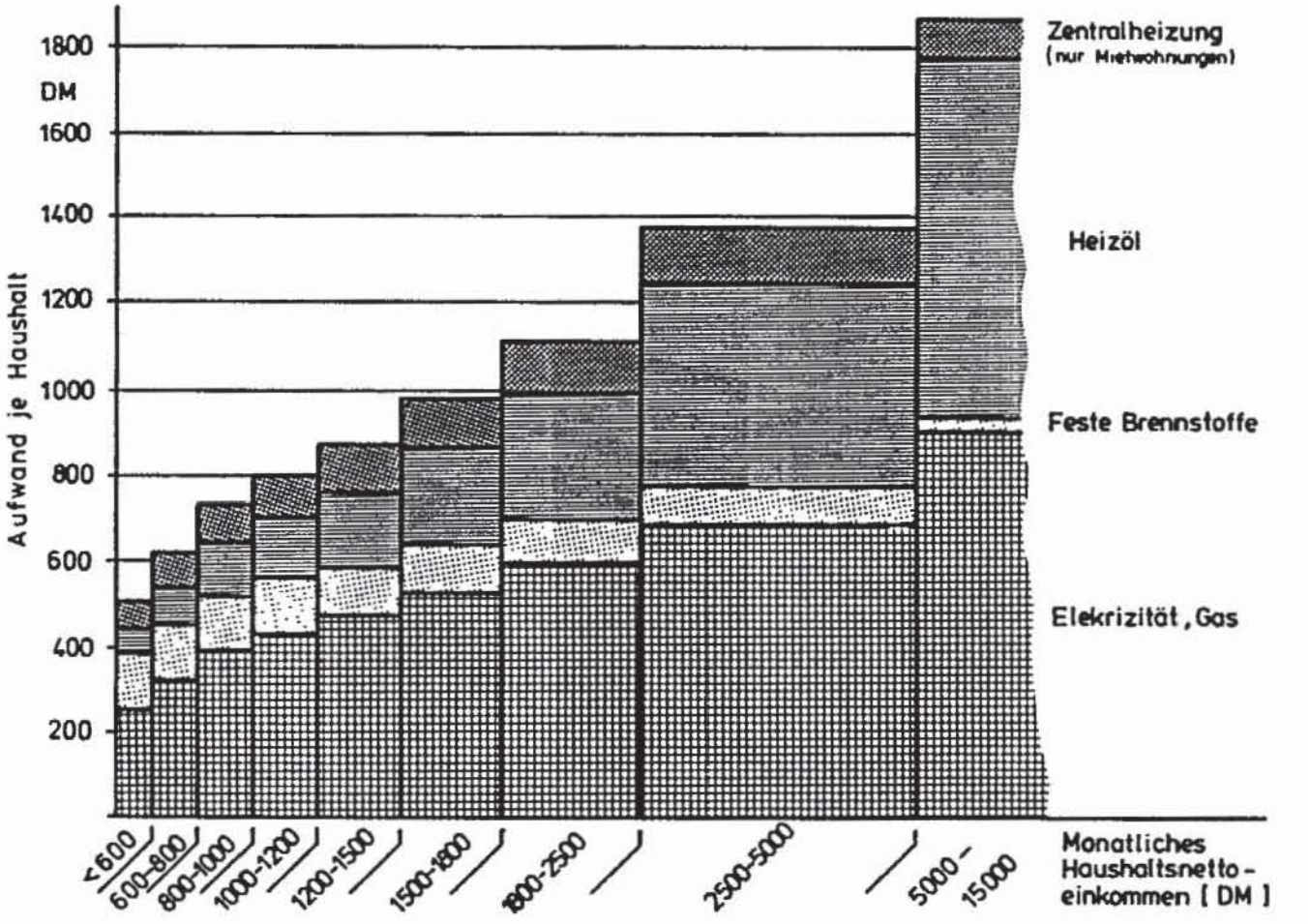



*Abbildung 6 Jahresaufwendungen privater Haushalte für Energie (1973)*

Verbesserungen möglich sind, wird doch die Entwicklung des industriellen Energieverbrauchs im wesentlichen von der Entwicklung der industriellen Produktion und von Änderungen der Industriestruktur bestimmt werden. Über die wirtschaftliche Entwicklung sind auch die Entwicklung des Energieverbrauchs und die Lösung der Beschäftigungsprobleme miteinander verknüpft.

Im Verkehrssektor wird über 80% der Energie durch den Straßenverkehr, also von Personen- und Lastkraftwagen, verbraucht. Obwohl heute bereits auf je 3,5 Einwohner ein PKW kommt, wird auch in Zukunft mit einem Anwachsen des Fahrzeugbestandes zu rechnen sein. Eine weitere Senkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs sowie eine weiter abnehmende jährliche Fahrleistung pro PKW werden aber auch in Zukunft zu deutlich geringeren Wachstumsraten des Energieverbrauchs im Verkehrssektor führen.

Faßt man das bisher Gesagte noch einmal zusammen, so stellt sich die Situation hinsichtlich des Wachstums des Energiebedarfs wie folgt dar: Weltweit gesehen, aber auch differenziert nach sozialen Gruppen, bestehen heute noch erhebliche Unterschiede im Pro-Kopf-Verbrauch an Energie. Allein deshalb und wegen der zu erwartenden Zunahme der Weltbevölkerung muß auch in Zukunft mit erheblichen Steigerungen des Energieverbrauchs gerechnet werden. Auch in unserem Land wird der Energieverbrauch weiter steigen, doch werden die Wachstumsraten hinter denen der Vergangenheit zurückbleiben. Eine weitere Erhöhung des Energieverbrauchs ist eine der notwendigen Voraussetzungen zur Angleichung des Lebensstandards zwischen den entwickelten und den unterentwickelten Staaten sowie zum Ausgleich sozialer Unterschiede in den meisten Ländern; sie ist damit gleichzeitig ein notwendiger Beitrag zum Abbau des sozialpolitischen Konfliktpotentials.

## 1.3. Energiereserven

Wenn wir also auch in Zukunft mit einer weiteren Steigerung des Energieverbrauchs zu rechnen haben, so gewinnt die Frage nach den vorhandenen Energievorräten eine besondere Bedeutung. Von dem Primärenergieaufkommen in der Bundesrepublik werden über 60%, überwiegend Erdöl und Erdgas, importiert. Diese Tatsache ist insbesondere auf die geringen heimischen Energiereserven zurückzuführen. Ein Blick auf die Tabelle 1 zeigt, daß diese Reserven zwar noch ca. 100 Jahre den heutigen Primärenergieverbrauch der Bundesrepublik (1977 rund 370 Mio. t SKE/a) decken könnten, aber schon unter Berücksichtigung eines wahrscheinlich höheren durchschnittlichen jährlichen Primärenergieverbrauchs über den Zeitraum von 1977 bis 2000 auf 70 Jahre sinken würde. Weiterhin fällt auf, daß die einheimischen Primärenergievorräte fast ausschließlich auf die Kohle entfallen. Ihre lineare Reichweite beträgt – bezogen auf die derzeitige Stein- und Braunkohlenförderung – 286 bzw. 394 Jahre. Würden aber von den Gesamtvorräten nur die ökonomisch gewinnbaren Vorräte berücksichtigt, so reduzierte sich die lineare Reichweite auf 65 bzw. 80 Jahre.

*Tabelle 1 Gesamtvorräte fossiler Energieträger in der Bundesrepublik Deutschland*

| | [Mio t SKE] |
|---|---|
| Steinkohle | 24000 |
| Braunkohle | 15000 |
| Erdöl | 172 |
| Erdgas | 673 |
| Gesamtvorräte | 39845 |

Von den nuklearen Energieträgern ist zwar Uran vorhanden, aber nur in so geringen Mengen, daß es wahrscheinlich keine Bedeutung für die Energieversorgung der Bundesrepublik haben wird.

Diese Situation der heimischen Energiereserven zeigt, daß auch in Zukunft der überwiegende Anteil der Kohlenwasserstoffe importiert werden muß. Es stellt sich somit die Frage: Welches mengenmäßige Energieangebot wird unter welchen ökonomischen Bedingungen (insbesondere unter Berücksichtigung der Angebotspreise) in Zukunft auf dem Weltenergiemarkt zu erwarten sein? In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Weltenergievorräte und ihre zeitlichen Reichweiten von Interesse.

In Abbildung 7 sind die Weltvorräte an fossilen und nuklearen Energiereserven zusammengestellt [10]. Hierbei wurde unterschieden in vermutlich technisch gewinnbare und die nach heutigem Stand ökonomisch gewinnbaren Reserven.

Vermutlich technisch gewinnbare Reserven sind Vorkommen, die unter günstigen Voraussetzungen gefördert werden können. Unter ökonomisch gewinnbaren Reserven ist der Teil der Gesamtreserven zu verstehen, der unter den jeweiligen technischen und derzeit wirt-

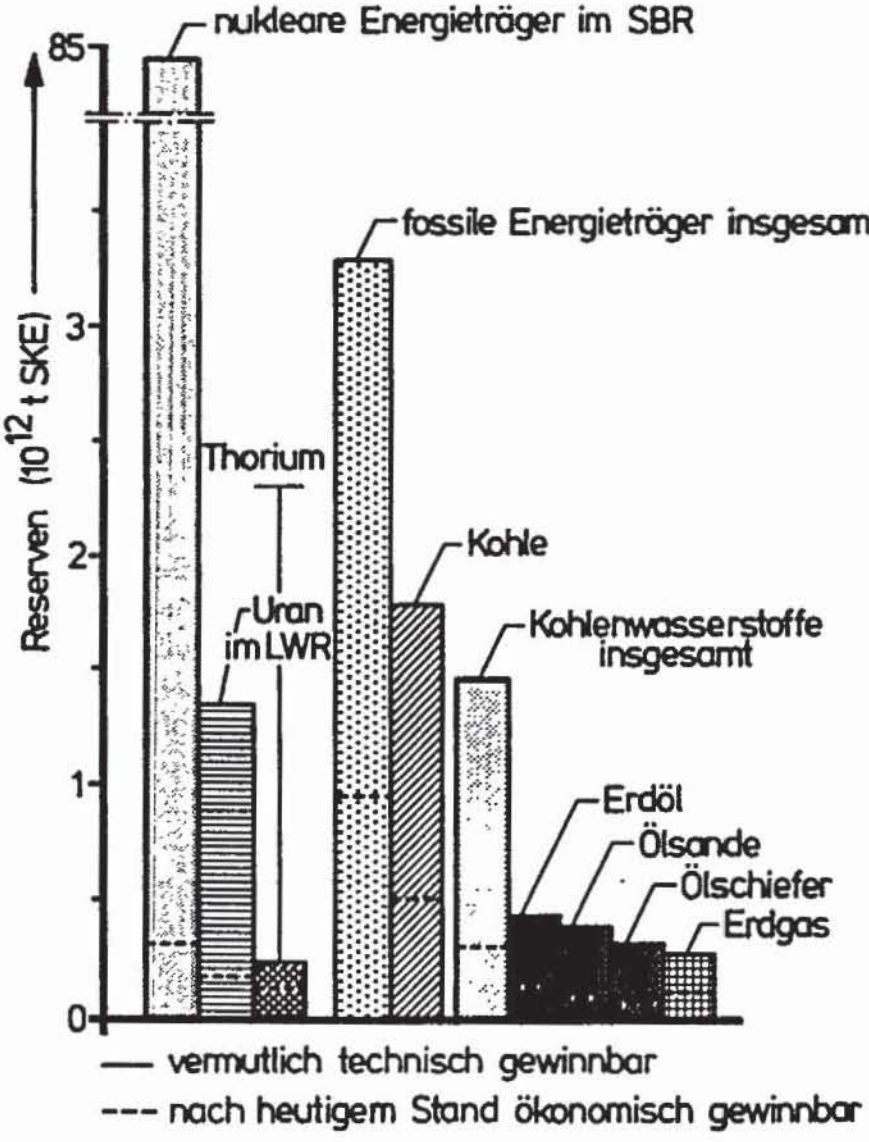



*Abbildung 7 Energiereserven der Welt* [2]

schaftlichen Bedingungen förderwürdig ist. Langfristige Energieplanungen müssen berücksichtigen, daß mit fortschreitender technologischer Entwicklung und Energiepreissteigerungen Teile von den vermutlich technisch gewinnbaren Reserven in ökonomisch gewinnbare Reserven überführt werden können.

Die vermutlich technisch gewinnbaren Reserven der fossilen Energieträger betragen 3324 Mrd. t SKE und die der nuklearen Energieträger, bei einer ausschließlichen Nutzung im Leichtwasserreaktor, 1695 Mrd. t SKE.

Bei den fossilen Energieträgern fällt der große Kohleanteil auf. Weiterhin wird deutlich, daß die nach dem heutigen Stand ökonomisch gewinnbaren Reserven nur einen geringen Teil der vermutlich technisch gewinnbaren Reserven darstellen. Als zeitliche Reichweiten ergeben sich für die fossilen Energieträger – bezogen auf den gesamten derzeitigen Weltenergieverbrauch von rd. 9,0 Mrd. t SKE – 370 Jahre für die vermutlich technisch gewinnbaren Reserven und 100 Jahre für die nach heutigem Stand ökonomisch gewinnbaren Reserven.

Wird nicht mit einem bleibenden Weltenergiebedarf, sondern mit einer Steigerungsrate von 2,8%/a bis zum Jahre 2025 gerechnet, wobei der Anteil der Kohlenwasserstoffe an der Deckung des Weltenergiebedarfs mit ca. 70% konstant bleiben soll, so reduziert sich die zeitliche Reichweite der vermutlich technisch gewinnbaren Reserven an Kohlenwasserstoffen auf 120 Jahre und der ökonomisch gewinnbaren Reserven auf 30 Jahre. Dies bedeutet, daß die Kohlenwasserstoffe aufgrund ihrer Nutzung als Energieträger in einem Zeitraum versiegen werden, wo sie als Rohstoffträger dringend benötigt werden.

Wird als Modellfall angenommen, daß der derzeitige Weltenergieverbrauch ausschließlich durch Kernenergie gedeckt wird, so würden die vermutlich technisch gewinnbaren Reserven an Uran und Thorium ca. 200 Jahre und die nach heutigem Stand ökonomisch gewinnbaren Reserven ca. 30 Jahre reichen. Werden statt der z. Z. im Betrieb befindlichen Leichtwasserreaktoren aber fortschrittliche Reaktortypen eingesetzt, so verlängert sich die zeitliche Reichweite z. B. bei Einführung von Brutreaktoren sogar auf das 50fache. Trotz dieser langen Reichweiten sei darauf hingewiesen, daß nach Uran noch nicht so intensiv exploriert worden ist wie bei den fossilen Energieträgern, so daß wahrscheinlich noch weitere Funde zu erwarten sind.

Was läßt sich aus der dargestellten Mengensituation für die Energieimporte ableiten?

Die derzeit ökonomisch gewinnbaren Erdöl- und Erdgasreserven werden wahrscheinlich gegen Ende dieses Jahrhunderts Erschöpfungstendenzen zeigen. Ökonomisch bedeutet dies, daß aufgrund dieser Verknappung und der zunehmenden Förderung technisch schwieriger gewinnbarer Reserven der Erdöl- und Erdgaspreis noch vor der Jahrhundertwende weiter ansteigen wird. Beim Erdöl ist noch zu berücksichtigen, daß durch politische Preisfestsetzungen seitens der OPEC zusätzliche Preissteigerungen oder auch Mengenrestriktionen möglich sind. In der Bundesrepublik Deutschland kommt für das Erdgas erschwerend hinzu, daß die heimische Erdgasförderung ihr jetzt erreichtes Plateau von 20 Mrd. $m^3$ nur noch bis ca. 1990 halten kann und daß einige wichtige Erdgasimportverträge (z. B. mit den Niederlanden) auslaufen und voraussichtlich nicht von den derzeitigen Erdgas-Exportländern verlängert werden. Dies bedeutet, daß aus weit entlegenen Gebieten (z. B. aus der UdSSR oder dem Iran) das Erdgas beschafft werden muß und die hieraus resultierenden hohen Transportkosten zu einem Ansteigen der Erdgaspreise führen werden.

Diese Überlegungen zeigen, daß aufgrund geologischer Gegebenheiten zwar keine akuten, aber mittel- und langfristige Versorgungsprobleme bei den fossilen Energieträgern zu befürchten sind. Keine akuten Versorgungsengpässe sind nur dann möglich, wenn die Ener-

gienachfrage jederzeit durch das Energieangebot gedeckt werden kann. Neuere Untersuchungen [12] zeigen aber, daß ab 1985 von dieser notwendigen Voraussetzung nicht unbedingt ausgegangen werden kann, da die OPEC-Länder ihre Förderkapazitäten wahrscheinlich nicht in dem Maße ausbauen werden, wie dies zur Deckung der zukünftigen Energienachfrage notwendig wäre. Dies bedeutet, daß schon vor Erreichen geologisch bedingter Verknappungen mit Versorgungsengpässen gerechnet werden kann.

Die Reichweite der Uranreserven verdeutlicht, daß mit der Nutzbarmachung der Kernenergie eine praktisch unbegrenzte Versorgung mit Energie möglich ist, wenn Technologien entwickelt und eingesetzt werden, die das Uran und Thorium weitestgehend ausnutzen.

Außer mit der Kernenergie und im begrenzten Umfang auch mit der Kohle sind aber heute noch weitere Optionen erkennbar, die eine langfristig ausreichende Energieversorgung sicherstellen können. Es sind die Sonnenenergie und die Kernfusion.

## 1.4. Kernenergie und ihre Alternativen

Im folgenden sollen nun die vier eben erwähnten Optionen für eine langfristige, brennstoffseitig praktisch nicht limitierte Energieversorgung näher untersucht werden.

Zu diesem Zweck wird für jede Option eine Nutzung in großem Umfang unterstellt, denn nur dadurch werden die Nebenwirkungen deutlich, die für eine Beurteilung ausschlaggebend sein können.

Jede der hier betrachteten Optionen (oder geeignete Kombinationen von ihnen) hat zur Folge, daß sich das Energieversorgungsproblem auf lange Sicht von einem Verfügbarkeits- in ein Handhabungsproblem wandelt. Dies heißt aber nicht, daß auch kurz- bzw. mittelfristig alle Versorgungsschwierigkeiten gelöst wären. Auf die Probleme des Übergangs von unserer heutigen, überwiegend auf fossiler Basis aufbauenden Energieversorgung zu einer langfristig wünschenswerten Versorgungskonzeption wird deshalb später noch einzugehen sein.

Die Charakterisierung und Beschreibung der einzelnen Alternativen richtet sich an den folgenden vier Kriterien aus:

- ihrem Energiepotential,
- ihrem Entwicklungsstand,
- ihren Kosten und
- ihren Nebenwirkungen.

Bei der Beschreibung des Entwicklungsstandes wird dabei von einer erweiterten Einteilung ausgegangen, die von Häfele [3] benutzt wurde. Danach müssen von großen technischen Entwicklungen vier Schwellen überwunden werden.

1. die Schwelle der physikalisch-wissenschaftlichen Durchführbarkeit,
2. die Schwelle der technisch-industriellen Durchführbarkeit,
3. die Schwelle der wirtschaftlich-kommerziellen Durchführbarkeit,
4. die Schwelle der öffentlich-gesellschaftlichen Akzeptierung.

### 1.4.1. Kohle

Über die Vorräte an Stein- und Braunkohle ist zuvor schon etwas gesagt worden. Von der Reservesituation würde, wie schon erwähnt, bei Anlegung eines strengen Maßstabes die Kohle nur bedingt eine langfristige Versorgung sicherstellen können. Da aber gerade die Stein- und Braunkohlevorräte in der Bundesrepublik Deutschland beträchtlich sind – sie könnten den derzeitigen Primärenergieverbrauch von 370 Mio. t SKE für nahezu 105 Jahre decken –, müssen sie hier in die Betrachtungen eingeschlossen werden. Trotz dieser günstigen Reservesituation ist die Förderung der Steinkohle in unserem Land in den letzten Jahrzehnten ständig rückläufig gewesen. Sie sank von 149,4 Mio. t im Jahre 1957 auf 85,0 Mio. t im Jahre 1977. Dies hat im wesentlichen zwei Gründe: Einmal sind die Förderbedingungen der Steinkohle in der Bundesrepublik sehr schwierig (Untertagebau), so daß trotz eines erheblichen technischen Fortschritts – sichtbar an der Steigerung der Förderleistung je Mann und Schicht um 250% seit 1957 – die Steinkohle bis zum Herbst 1973 bei uns zum teuersten Energieträger geworden war. Die Steigerung der Ölpreise hat die Wettbewerbsfähigkeit der Kohle zwar verbessern können, konnte aber die Kostendifferenz noch nicht vollständig beseitigen. Der zweite Grund ist die gegenüber den flüssigen und gasförmigen Energieträgern und besonders gegenüber dem Strom unbequeme Handhabung der Kohle für den Verbraucher. Läßt sich dieser Nachteil durch die heute stark in den Vordergrund getretene Umwandlung der Kohle in gasförmige und flüssige Sekundärenergieträger ausgleichen – wobei einer Kombination von Kohle und Kernenergie aus Kostengründen eine wichtige Funktion zukommt –, so werden die schlechten Förderbedingungen weiterhin bestehen bleiben.

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Kohle – auch unter dem Gesichtspunkt der Verringerung der Versorgungsrisiken durch einen angemessenen Anteil inländischer Energieträger – dennoch zu erhalten, sind vom Staat eine Reihe von Maßnahmen (Kokskohlenbeihilfe, Verstromungsgesetze, Heizölbesteuerung, usw.) ergriffen worden, die eine Stabilisierung der Kohleproduktion zum Ziel haben. Dies kommt auch in der angestrebten Förderkapazität von 94 Mio. Jahrestonnen im Jahre 1985 zum Ausdruck, die in der zweiten Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung ausgewiesen ist. Inwieweit eine erhebliche Steigerung der Steinkohlenförderung über diese angestrebte Menge hinaus überhaupt möglich ist, ist im wesentlichen ein Problem der Verfügbarkeit des notwendigen Kapitals und der zusätzlichen Arbeitskräfte.

Die Situation der Braunkohle stellt sich etwas anders dar. Sie hat durch Produktionssteigerungen in den letzten Jahren ihren Anteil an der Primärenergieversorgung von 8,7% halten können. Braunkohle wird heute zum überwiegenden Teil zur Stromerzeugung eingesetzt, und zwar in Kraftwerken, die aus Transportkostengründen unmittelbar in der Umgebung der Abbaugebiete stehen. Die Braunkohle wird auch zukünftig einen wesentlichen Beitrag zur Elektrizitätsversorgung leisten, darüber hinaus wird sie im Verbund mit der Kernenergie zur Erzeugung synthetischen Erdgases eingesetzt werden können.

Als die im Rahmen dieser Betrachtung wichtigsten Nebeneffekte einer großtechnischen Nutzung der Kohle sind die ökologischen Beeinflussungen zu nennen. Dabei muß man generell zwischen den Umweltbelastungen unterscheiden, die durch technische Maßnahmen reduzier- oder sogar vermeidbar sind, und denen, die prinzipiell nicht umgangen werden können. Zu den letzteren gehört das bei einer Verbrennung fossiler Energieträger notwendigerweise anfallende $CO_2$ (Kohlendioxid). Auf die mit technischem Aufwand vermeidbaren Belastungen, wie z. B. die $SO_2$, $NO_x$- und Staubemissionen soll hier nicht eingegangen werden, da sie mit einem entsprechenden Kosten- und Energieaufwand auf ein tolerierbares Maß reduziert werden können.

Mit der zunehmenden Emission von $CO_2$ aus fossilen Energiewandlungsverfahren ist die Gefahr globaler Klimaveränderungen verbunden. Diese hat ihre Erklärung in dem sogenannten Treibhauseffekt aufgrund einer höheren $CO_2$-Konzentration in der Atmosphäre, der zu einer Temperaturerhöhung führt. In den letzten Jahren sind eine Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zum $CO_2$-Problem gemacht worden [4, 5, 13, 14]. Endgültige Klarheit gibt es noch nicht. Nach dem derzeitigen Stand des Wissens muß man jedoch annehmen, daß eine Verdopplung der $CO_2$-Konzentration in der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung von 2 °C in den Tropen und 10 °C an den Polen führen könnte. Es ist nicht auszuschließen, daß eine derartige klimatische Änderung schwerwiegende Folgen z. B für die Landwirtschaft mit sich brächte. In den letzten zehn Jahren hat der $CO_2$-Gehalt der Atmosphäre um etwa 3% zugenommen. Das $CO_2$-Problem und die damit verbundenen klimatischen Risiken stellen also möglicherweise einen limitierenden Faktor für die Nutzung der Kohle im großen Maßstab dar.

Die Kohle ist somit weniger eine Alternative zur Kernenergie, als ein kurz- und mittelfristig wertvoller Partner der Kernenergie zur Verringerung unserer Abhängigkeit vom Erdöl. Hierbei kommt den Techniken der nuklearen Kohlevergasung und Kohleverflüssigung eine besondere Bedeutung zu.

### 1.4.2. Sonnenenergie

Die Sonne stellt mit einer auf die Erde eingestrahlten Leistung von 178 Mrd. MW[1]) die größte kontinuierliche Energiequelle des Menschen dar, die allein erst das Leben auf diesem Planeten ermöglicht. Um eine Vorstellung von dieser Energiemenge zu bekommen, sei erwähnt, daß dies über 20000mal so viel ist wie der heutige jährliche Weltenergieverbrauch. Selbst nach erheblichen Verlusten in der Atmosphäre erreicht den Boden der Bundesrepublik Deutschland noch ein Energiestrom, der den gesamten Primärenergiebedarf der Bundesrepublik um das 80fache übersteigt.

Diese Zahlen sind sehr verlockend, gerade unter dem Aspekt, daß die Sonnenenergie neben der Geothermie, welche für die Bundesrepublik Deutschland nur eine regional eng begrenzte Bedeutung haben wird, zu den regenerativen, d. h. sich erneuernden Enegieströmen zählt. Wenden wir uns aber nun nach dieser globalen Betrachtung einer detaillierten Untersuchung zu.

Die solare Strahlung kann auf der Erde entweder direkt oder indirekt nach Zwischenschaltung eines natürlichen Energiewandlungsprozesses genutzt werden (vgl. Kap. 15) und wäre grundsätzlich in der Lage, alle Formen der heute benötigten Sekundärenergieträger für die Energieversorgung bereitzustellen. Für die Bundesrepublik Deutschland scheiden aber schon aus regionalen Besonderheiten einige Energiewandlungssysteme aus. Hierbei handelt es sich um die Gletschereiskraftwerke, Meeresströmungskraftwerke und Meereswärmekraftwerke, da diese aus klimatologischen Gründen nicht einsetzbar sind. Prinzipiell wäre der Einsatz von Meereswellenkraftwerken möglich, sie könnten aber auf der gesamten Küstenlänge unseres Landes nur eine theoretische Leistung von 3600 $MW_e$[2]) – d. h. nur 5% unserer derzeit installierten Kraftwerksleistung – bereitstellen.

Darüber hinaus ergäben sich schwer lösbare Energiespeicherungs- und Transportprobleme. Einen ähnlichen Sachverhalt findet man bei der Nutzung der Bioproduktion, sei es über

[1]) MW=1000 kW

[2]) $MW_e$=Elektrische Leistung in MW

Verbrennungsprozesse oder über Umwandlungsprozesse zur Erzeugung von Biogasen. In industrialisierten Ländern wird der Einsatz dieser Umwandlungssysteme nur dort sinnvoll sein, wo er zur wirtschaftlicheren Müll- und Abfallbeseitigung beiträgt.

Etwas günstiger wird der Einsatz der Windenergie zu beurteilen sein, da diese regional einen Beitrag in Gebieten mit relativ hohen Windgeschwindigkeiten – wie z. B. in den Küstenländern – leisten kann.

Ein Blick auf die Entwicklung der Wasserkraftnutzung zeigt, daß das technisch-ökonomische Laufwasserpotential schon fast zu 100% ausgeschöpft ist und die Errichtung von Pumpspeicherkraftwerken nur noch in engen Grenzen zur Spitzenstromabdeckung möglich sein wird.

Optimistischer kann das Zukunftsbild für die Wärmepumpe beurteilt werden. Der überwiegende Teil der Sonnenenergie wird in Form von Wärme in der Atmosphäre sowie im Wasser und im Boden der Erdoberfläche gespeichert. Dies geschieht auf einem Temperaturniveau, das für die Energienachfrage nicht nutzbar ist. Hier können Wärmepumpen Abhilfe schaffen, indem sie mit hochwertiger mechanischer oder thermischer Energie das Temperaturniveau anheben und somit für Heizungs- und Warmwasserbereitungszwecke nutzbar machen (Abbildung 8). Weitere Untersuchungen werden aber noch zeigen müssen, inwieweit diese Technologie technisch-ökonomisch im großen Maßstab einsetzbar sein wird.

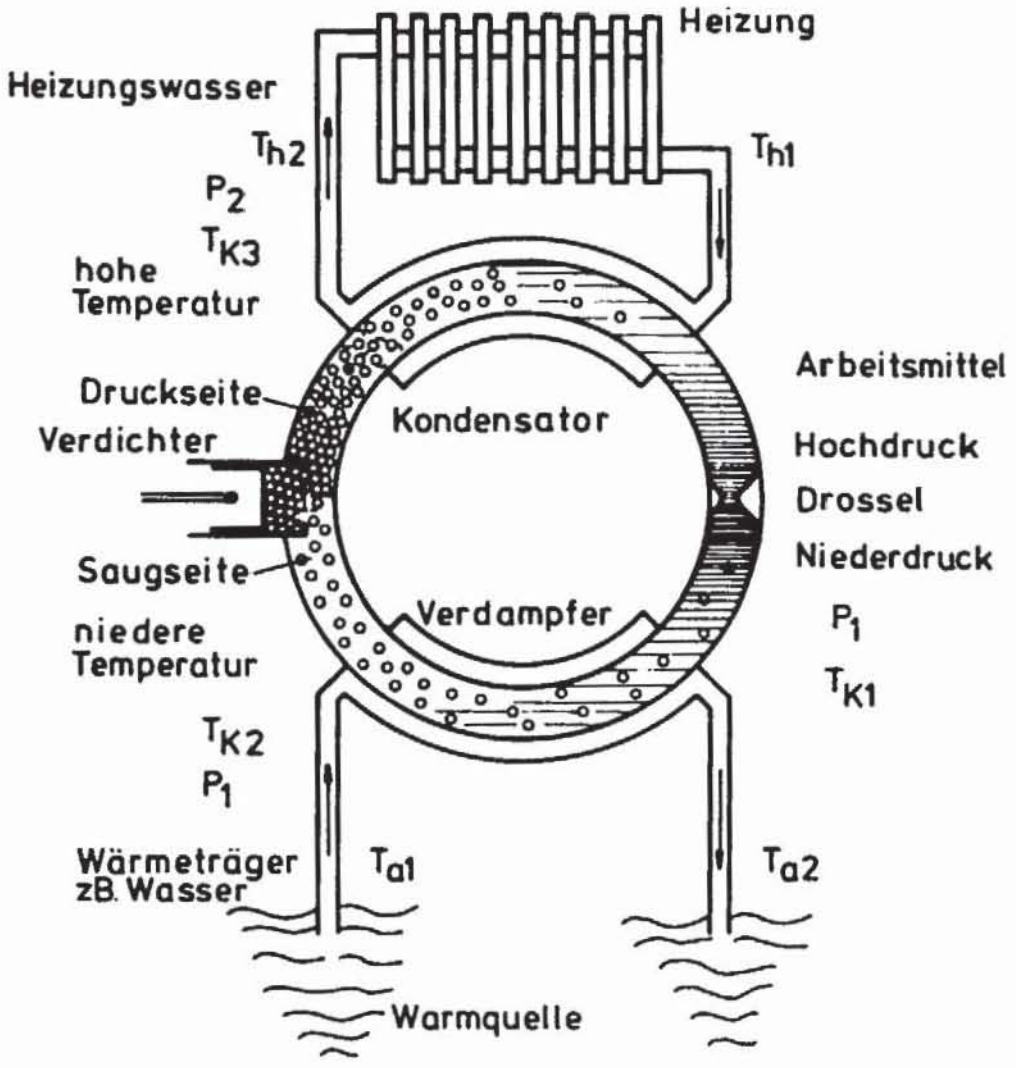



*Abbildung 8 Prinzipskizze einer Wärmepumpe*

Von den indirekten Nutzungsmöglichkeiten der Sonnenenergie sind also nur die Windenergiekonverter und Wärmepumpen von Bedeutung. Direkt nutzbar erscheint die Sonnenenergie zur Zeit nur mit Hilfe der thermischen Kollektoren. Die Fotolyseeinrichtungen befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium und die Nutzung von Sonnenenergie durch Solarzellen wird wohl in unseren Breitengraden an der geringen Sonnen-Energiedichte scheitern. Die Sonnen-Energiedichte, d.h. die pro Flächeneinheit auf die Oberfläche der Erde auftreffende Energie beträgt, gemittelt über das Jahr und die geographischen Breiten, nur 160 W/m² [6]. In einem modernen 1000-MW-Kraftwerk mit einem Platzbedarf von 250 m · 250 m beträgt die je Quadratmeter umgesetzte Energie etwa 40000 W/m², also etwa das 250fache. Hiermit ist aber auch schon ein Problem der solaren Option genannt, das des großen Flächenbedarfs. Dieser beträgt für ein 1000-$MW_e$-Kraftwerk, das auf der geographischen Breite von Bochum installiert wäre, etwa 100 km². Hierbei wurde von einer durchschnittlichen Energiedichte von 100 W/m² (Entsprechend dem geographischen Standort Bochums) und einem Systemwirkungsgrad von 10% ausgegangen.

Diesen Sachverhalt erläutert die Abbildung 9. Es wird deutlich, welche Flächen in der Bundesrepublik mit solarelektrischen Kollektoren belegt werden müßten, um den Strombedarf im Jahre 2000 decken zu können (z.B. die Fläche von Schleswig-Holstein bei einem Umwandlungswirkungsgrad von 6%). Es ist fraglich, ob so große zusammenhängende Flächen in Deutschland zur Verfügung gestellt werden können [9].

Ein anderes für die Nutzung der Solarenergie typisches Problem resultiert aus den jahres- und tageszeitlichen Schwankungen des Sonnenenergieangebots. Aus diesem Grunde ist die Verwendung der Sonnenenergie eng mit praktikablen und wirtschaftlichen Lösungen des Energiespeicherproblems verknüpft.

Aus der Vielzahl von technischen Konzepten zur Nutzung der Sonnenenergie, die in jüngster Zeit vorgeschlagen wurden, sollen hier nur zwei erläutert werden, die aber dennoch das Spektrum der Umwandlungsmöglichkeiten gut abdecken. Der zur Zeit wichtigste, weil am ehesten realisierbare Einsatzbereich ist der zur Raumheizung und Warmwasserbereitung. Diese dezentrale Form der Sonnenenergienutzung bedient sich der Dachfläche eines Hauses, um die Sonnenenergie einzufangen. In Abbildung 10 ist der prinzipielle Aufbau eines derartigen Sonnenhauses dargestellt. Das auf die Dachfläche auftreffende sichtbare Licht wird über stark wärmeabsorbierende Schichten in Wärme umgewandelt, die von einem Wärmeübertragungssystem in einen Wärmespeicher transportiert wird. Aus diesem Wärmespeicher werden die normalen Heizkörper des Hauses mit Energie versorgt. Zur Überbrückung von Zeiten geringer Sonneneinstrahlung ist eine konventionell betriebene Hilfsheizung installiert.

Eine Reihe von Experimentier- und Prototyphäusern ist bereits in Betrieb. Die Konzepte der Nutzung von Sonnenenergie zur Raumheizung haben teilweise die Schwelle der technisch-industriellen Durchführbarkeit bereits überwunden. Ob ihnen auch der wirtschaftliche Durchbruch gelingt, hängt zum einen von ihrer eigenen Kostenentwicklung und der der konkurrierenden Energieträger ab, und zum anderen hat darauf der geographische Einsatzort einen großen Einfluß. Die Aussichten für die Bundesrepublik können noch nicht endgültig beurteilt werden, sie scheinen aber wegen der Unregelmäßigkeit der Sonneneinstrahlung und der großen Zahl von mehrgeschossigen Bauten nicht gerade günstig zu sein.

Noch ein gutes Stück entfernt von der Schwelle der technisch-industriellen Durchführbarkeit sind die Konzepte zur zentralen Umwandlung von Sonnenenergie für die Bereitstellung

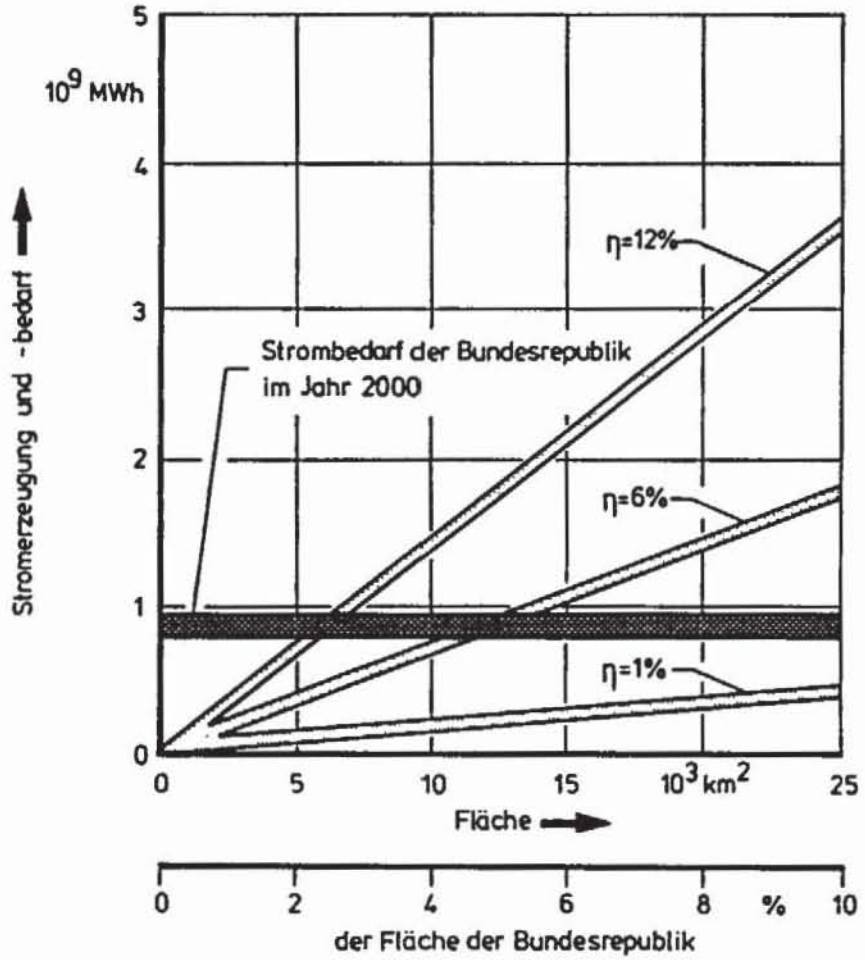



*Abbildung 9 Flächenbedarf für solarelektrische Stromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad η*

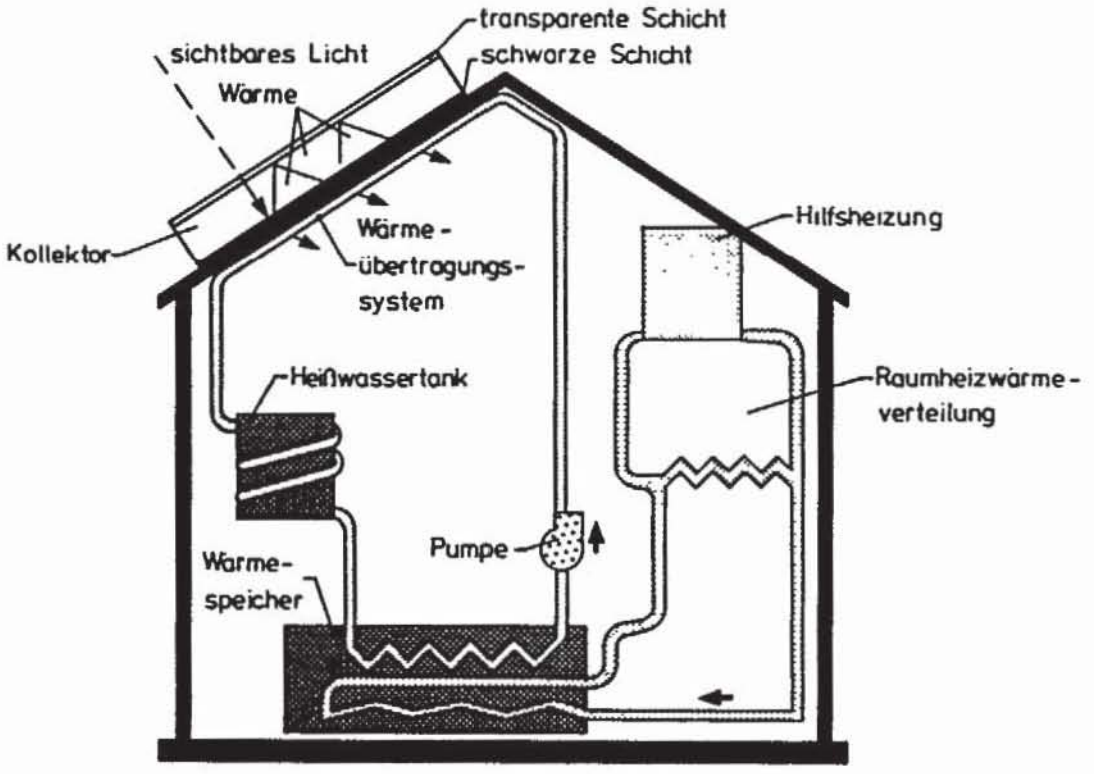



*Abbildung 10 Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung (Prinzipskizze)*

sehr großer Leistungen. Als Beispiel dafür sei hier die Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie mit Hilfe der Solarzelle genannt. Die Solarzelle hat ihre Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit seit Jahren bei der Energieversorgung von Raumflugkörpern bewiesen. Allerdings waren die dort benötigten Leistungseinheiten nicht mit denen, die hier zur Diskussion stehen, vergleichbar. Der Wirkungsgrad der Solarzelle beträgt zwar z. Z. nur etwa 10%, theoretisch möglich ist jedoch eine Erhöhung auf 20–25%. Die Kosten allein für die Solarzellen liegen heute aber noch um mehrere Größenordnungen außerhalb des Rentabilitätsbereichs.

Zu dem Problem der Energiespeicherung tritt bei der zentralen Umwandlung der Sonnenenergie zusätzlich noch das Problem des Energietransports über zum Teil große Entfernungen. Im Hinblick darauf ist die zukünftige Entwicklung bei den Sekundärenergieträgern nicht ohne Bedeutung, denn es scheint, daß Wasserstoff als Sekundärenergieträger wegen seiner besseren Transportmöglichkeiten eher zur Sonnenenergie paßt als Elektrizität.

Nun noch einige Anmerkungen über die Umwelteffekte bei der Nutzung der Sonnenenergie. Weit verbreitet ist die Ansicht, daß die Nutzung der Sonnenenergie, weil diese eine natürliche Energiequelle ist, keine Veränderung der Umwelt mit sich bringt. Dies ist nicht ganz richtig. Die Umwelteffekte sind zwar nicht so offenkundig und nur bei einer Nutzung der Sonnenenergie im großen Umfang von Bedeutung. So werden zum Beispiel Tausende von Quadratkilometern Land jeder anderen Nutzung entzogen und obwohl durch die „Aberntung" der Sonnenenergie der globale Energiehaushalt der Erde nicht verändert wird, sind dennoch Auswirkungen auf die regionale atmosphärische Zirkulation und damit Veränderungen des Mikro- und Makroklimas nicht auszuschließen.

### 1.4.3. Kernenergie

Unter dem Begriff Kernenergie subsummiert man gewöhnlich sowohl die Kernspaltung wie auch die Kernfusion. Auf die erstere soll hier zunächst eingegangen werden.

Wir haben bereits gesehen, daß mit dem Uran praktisch unbegrenzte Reserven für die Kernspaltung zur Verfügung stehen. Dies ist allerdings nur zutreffend, wenn in absehbarer Zeit der Hochtemperaturreaktor (HTR) [15] und der Schnelle Brutreaktor (SBR) [16] eingeführt werden, da die heutigen Leichtwasserreaktoren das Uran nur zu einem geringen Teil ausnutzen können. Der Hochtemperaturreaktor macht außerdem noch die Thoriumvorräte nutzbar, die annähernd 30% größer sind als die Uranvorräte. Die friedliche Nutzung der Kernenergie wird heute in der breiten Öffentlichkeit oft nur in einem direkten Zusammenhang mit der Elektrizitätserzeugung gesehen. In Wirklichkeit ist es jedoch möglich, mit der Kernenergie das gesamte zukünftig interessante Spektrum an Sekundärenergieträgern zu erzeugen.

In Abbildung 11 sind schematisch diese Umwandlungsmöglichkeiten dargestellt. Neben der Erzeugung von Strom ermöglicht die Kernenergie die Erzeugung von Wärme, die als industrielle Prozeßwärme oder zur Raumheizung verwendet werden kann, auf den verschiedenen Temperaturniveaus, die Erzeugung von Wasserstoff ($H_2$) aus Wasser oder in Kombination mit fossilen Primärenergieträgern, sowie die Bereitstellung von synthetischem Erdgas ($CH_4$) durch die nukleare Kohlevergasung oder die Ölspaltung und die Erzeugung höherer Kohlenwasserstoffe (Benzin).

Dem Hochtemperaturreaktor kommt in diesem Zusammenhang – wegen seines Temperaturpotentials von 1000 °C und mehr – eine besondere Bedeutung zu.

Ein Motiv für die Entwicklung der Kernenergie war, wie schon erwähnt, die Möglichkeit, Energie kostengünstig bereitzustellen. Die Vielzahl der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke sind der augenscheinliche Beweis dafür, daß die Wirtschaftlichkeitsschwelle bereits überwunden ist. Abbildung 12 verdeutlicht dies durch eine Gegenüberstellung der Stromerzeugungskosten verschiedener Kraftwerkstypen.

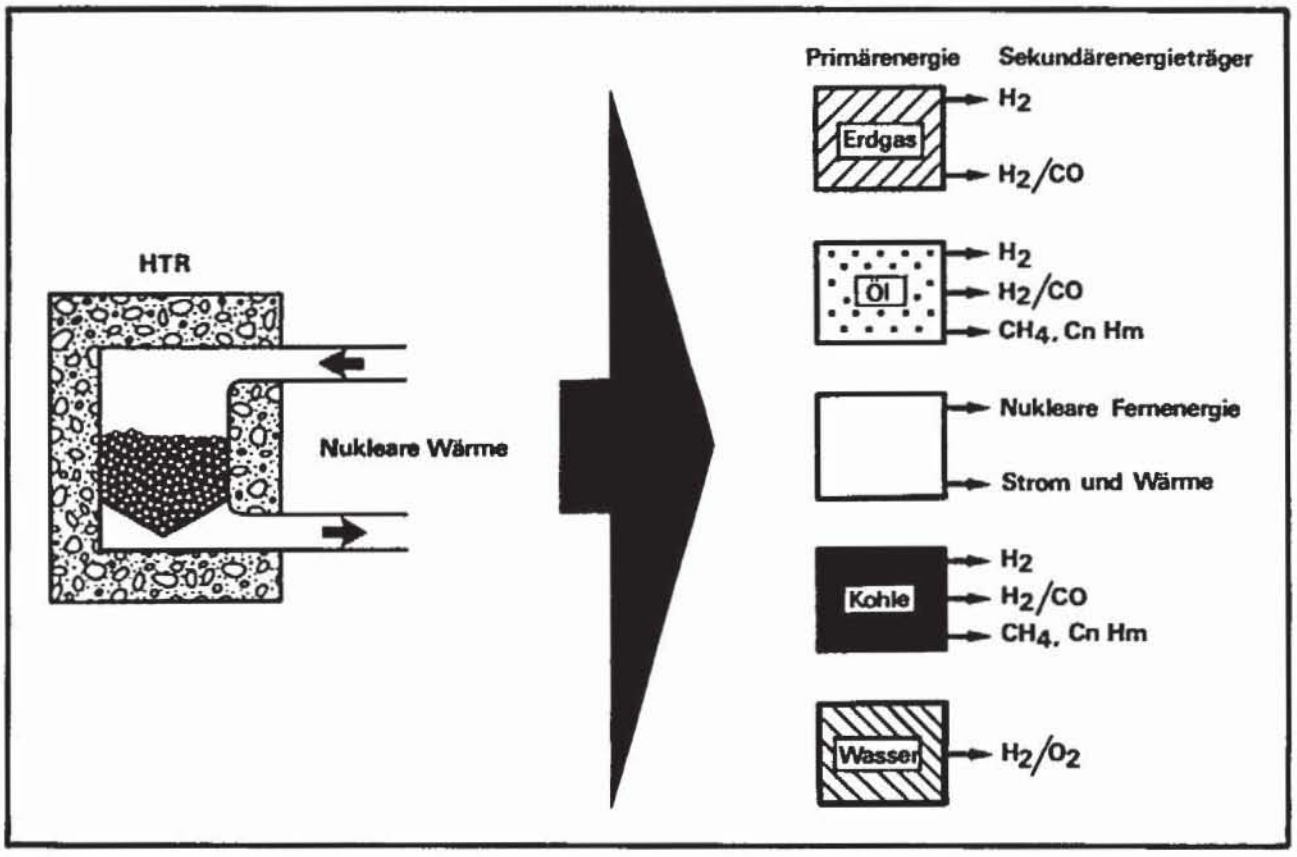



*Abbildung 11 Umwandlungsmöglichkeiten von Kernenergie in Sekundärenergie*

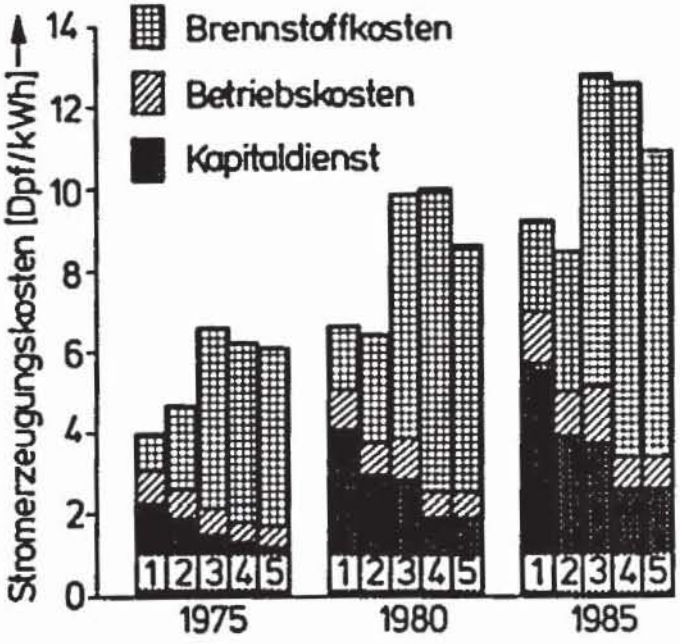
Im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit der Kernenergienutzung ist noch ein Hinweis auf die gegenüber konventionellen Kraftwerken anders geartete Kostenstruktur notwendig. Diese drückt sich in einer geringen Abhängigkeit der Stromerzeugungskosten von einer Steigerung der Brennstoffkosten aus. So erhöhen sich die Stromerzeugungskosten eines Kernkraftwerks bei Verdopplung des Uranpreises nur um etwa 3–10%, während sie bei einem fossilen Kraftwerk bei einer Verdoppelung der Brennstoffpreise um 50–60% ansteigen.

Wenden wir uns nun den Nebeneffekten einer Nutzung der Kernenergie im Großen zu. Da in den nachfolgenden Beiträgen auf den Brennstoffkreislauf, die Strahlenbelastung und die Sicherheit kerntechnischer Anlagen noch detailliert eingegangen wird, soll hier nur die Problemstruktur erläutert werden:

Die wichtigsten und unerwünschten Nebeneffekte einer Nutzung der Kernenergie sind

- die radiologischen Belastungen durch Kernenergieanlagen im Normalbetrieb,
- die potentielle Gefährdung durch Reaktorunfälle und
- die Erzeugung von radioaktiven Abfallprodukten.

Auf das Abwärmeproblem wird hier nicht eingegangen, da es nicht kernenergiespezifisch ist.




| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1. Leichtwasserreaktor | 10 | 30 | 55 | $/lbU$_3O_8$ |
| 2. Braunkohle | 2,00 | 2,50 | 3,25 | DM/GJ |
| 3. Steinkohle* | 135 | 180 | 225 | DM/t |
| 4. Heizöl * | 185 | 320 | 400 | DM/t |
| 5. Erdgas | 4,50 | 6,25 | 8,00 | DM/GJ |

* Entschwefelung ab 1980

*Abbildung 12 Stromerzeugungskosten verschiedener Kraftwerkstypen in der Bundesrepublik Deutschland*

Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitungsanlagen geben im Normalbetrieb radioaktive Stoffe über den Kamin und mit dem Abwasser an die Umgebung ab, deren Menge durch geeignete Rückhaltemaßnahmen einstellbar ist. Einen Maßstab zur Beurteilung dieser zusätzlichen Strahlenbelastung liefert die Schwankungsbreite der natürlichen, also unumgänglichen Strahlenbelastung. Es ist bekannt, daß die natürliche radioaktive Belastung der Bevölkerung in der Bundesrepublik Deutschland bei etwa 100 mrem/a und die Schwankungsbreite, die im wesentlichen bedingt ist durch geographische und geologische Gegebenheiten, bei etwa 30 mrem/a für größere Bevölkerungsgruppen und 250 mrem/a für einzelne Personen liegt [8]. Demgegenüber liegt die radiologische Belastung durch Kernkraftwerke bei wenigen mrem/a, jedenfalls unter 5 mrem/a. Wenn nun bei dieser Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenbelastung keine genetischen und somatischen Schäden feststellbar sind, sollten Zusatzbelastungen im Bereich dieser Schwankungen eigentlich für den einzelnen eine zumutbare und akzeptable Belastung darstellen.

Prinzipiell geht es also bei der Beurteilung von radioaktiven Belastungen um eine Verständigung darüber, was zumutbar und akzeptierbar ist, also um das Setzen von Maßstäben und Normen. Die Festlegung zumutbarer Risiken kann aber nicht allein von naturwissenschaftlichen Ergebnissen getragen werden, sondern hier spielt offensichtlich das Element des Ermessens, das Abwägen von Schaden und Nutzen und die Frage nach den Alternativen eine wichtige Rolle. Man sollte sich dies stärker bewußt machen.

Mit einem ähnlich strukturierten Entscheidungsproblem hat man es im Kern auch bei einem Versuch der Bewertung des Störfall-Risikos von kerntechnischen Anagen zu tun. Im Gegensatz zu den radiologischen Belastungen des Normalbetriebs stehen dabei hypothetische Reaktorunfälle, also potentielle Belastungen, zur Diskussion. Durch technische Vorsorgemaßnahmen – z. B. redundante Auslegung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten – läßt sich die Schadenswahrscheinlichkeit zwar nahezu beliebig klein halten, sie wird jedoch nicht zu Null. Diese von Null verschiedene Schadenswahrscheinlichkeit für Störfälle in kerntechnischen Anlagen wird gewöhnlich mit dem Begriff des Restrisikos bezeichnet. Die wissenschaftliche Ermittlung dieses Restrisikos, oder anders ausgedrückt, der Wahrscheinlichkeit eines Störfalles, kann auch hier nur den einen Teil der für den Bewertungsprozeß notwendigen Informationen liefern. Den anderen erhält man aus einer Betrachtung der natürlicherweise vorhandenen Risiken, wie z. B. natürliche Krankheiten oder Naturkatastrophen und der zivilisatorischen Risiken, die wir freiwillig bewußt oder unbewußt täglich eingehen, z. B. im Straßenverkehr.

In der folgenden Tabelle sind einige dieser Risiken dem Unfallrisiko der Kernenergie gegenübergestellt. Die Angaben gelten für die USA mit einer Bevölkerung von 200 Mio. Menschen unter der Annahme, daß 15 Mio. Menschen innerhalb eines Radius von 15 Meilen von 100 Kernkraftwerksstandorten leben.

*Tabelle 2* *Zusammenstellung verschiedener Unfallrisiken* [7]

| Art des Risikos | Tote/a | Schadensrisikowert (Tote je Person und Jahr) |
|---|---|---|
| Verkehrsunfälle | 55791 | $3 \cdot 10^{-4}$ |
| Stürze | 17827 | $9 \cdot 10^{-5}$ |
| Feuer | 7451 | $4 \cdot 10^{-5}$ |
| Tornados | 91 | $4 \cdot 10^{-7}$ |
| Reaktorunfälle | 0,04 | $2 \cdot 10^{-10}$ |

Da hier, wie erwähnt, die Erläuterung der Problemstruktur von Nebeneffekten der Kernenergie im Vordergrund steht, braucht auf die Fragen der Lagerung radioaktiver Abfallprodukte in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen werden, da hierbei keine prinzipiell neuen Sachverhalte auftreten. Immerhin soll festgestellt werden, daß hier technische Lösungen gefunden werden müssen, die sicherstellen, daß über Zeiträume, die in der traditionellen Technik bisher nicht zur Diskussion standen, das zumutbare Risiko nicht überschritten wird.

Wir haben versucht, deutlich zu machen, daß die Beurteilung von Belastungen und Risiken nur teilweise auf wissenschaftlichen Fakten aufbauen kann. Ermessensfragen, das Abwägen von Schaden und Nutzen spielen eine wichtige Rolle. Natürlich ist dies nicht nur charakteristisch für die Nebeneffekte einer Energieversorgung mit Kernenergie. Die Beurteilung

der Zumutbarkeit chemischer Belastungen aus der Verbrennung fossiler Energieträger oder klimatischer Änderungen im Zusammenhang mit der Nutzung der Sonnenenergie werfen dieselben Fragen auf.

### 1.4.4. Kernfusion

Als letzte der hier zur Diskussion stehenden Optionen soll nun noch kurz auf die Kernfusion eingegangen werden. Obwohl in den letzten Jahren einige experimentelle Fortschritte erzielt wurden, hat die Kernfusion die Schwelle der physikalisch-wissenschaftlichen Durchführbarkeit noch nicht überschritten. Zeitangaben über den möglichen Beginn einer großtechnischen Nutzung sind deshalb nur mit großer Unsicherheit zu machen. Genauere Angaben sind hingegen über das Energiepotential der Kernfusion möglich. So ist allein bei der Deuterium-Tritium-Reaktion der nutzbare Energievorrat siebenmal größer als bei der Kernspaltung. Durch die Aktivierung der Strukturmaterialien und durch das Brüten von Tritium treten bei der Kernfusion allerdings Nebeneffekte auf, die mit denen bei der Kernspaltung vergleichbar sind. Eine Quantifizierung dieser Nebeneffekte ist heute noch nicht möglich.

## 1.5. Versuch einer zusammenfassenden Wertung

Bevor die bisherigen Überlegungen zusammengefaßt und einige Schlußfolgerungen daraus gezogen werden, sollen noch zwei Aspekte erwähnt werden, die bei der Beurteilung unserer Energieversorgungsoptionen nicht vergessen werden dürfen. Der erste betrifft die für die Entwicklung und Einführung neuer Energietechnologien notwendigen Zeiträume. Diese liegen bei den Technologien, die hier zur Diskussion stehen, in der Größenordnung von 30–40 Jahren. Die Kernenergie ist ein Beispiel dafür. Der erste Reaktor, gebaut von Enrico Fermi, wurde 1942 kritisch. Heute, achtunddreißig Jahre später, trägt die Kernenergie erst 2% zur Deckung des Weltenergiebedarfs bei. Wenn man also in diesen Zeiträumen denken muß, so bedeutet dies zweierlei:

1. Die Entwicklung der Energietechnologien für das nächste Jahrhundert muß schon heute in Angriff genommen werden, und
2. die Übergangsphase bis zur Einführung der langfristigen Lösungen gewinnt eine besondere Bedeutung.

Der Zeithorizont dieser Übergangsphase wird aber bestimmt durch die Reichweite der Erdöl- und Erdgasreserven. Energietechnologien, die aufgrund ihres Entwicklungsstandes in der Lage sind, Erdöl und Erdgas schnell und im großen Umfang zu substituieren, erhalten vor diesem Hintergrund ein besonderes Gewicht. Hier schließt dann auch gleich der zweite Aspekt, und zwar der der Rohstoffunktion der fossilen Primärenergieträger an. Es wurde bereits erwähnt, daß heute schon 11% des Erdöl als Rohstoff in der chemischen Industrie verarbeitet werden. Die Bedeutung dieses Industriezweiges hat in den letzten Jahrzehnten enorm zugenommen; Ausdruck dafür ist seine starke Expansion. Es scheint deshalb notwendig, die Rohstoffbasis der chemischen Industrie, gerade auch im Hinblick auf ihre zukünftig noch zunehmende Bedeutung, durch einen verminderten Verbrauch der fossilen Energieträger für energetische Zwecke zu erhalten.

Die vorangegangenen Ausführungen sollten einen Überblick über die langfristigen Optionen der Energieversorgung geben. Dabei standen weniger technisch-wirtschaftliche De-

tails im Vordergrund als das Bemühen um eine Darstellung der übergeordneten Problemzusammenhänge und ihre Einordnung. Damit wurde das Ziel verfolgt, die komplexen Probleme der Energieversorgung im Sinne einer ersten Orientierungs- und Entscheidungshilfe aufzuarbeiten. Eben wegen dieser Komplexität der Energieversorgungsprobleme konnte der Überblick natürlich nicht vollständig sein. Dennoch läßt sich abschließend ein Fazit wie folgt ziehen:

1. Jede Nutzung eines Primärenergieträgers im großen Umfang bringt unerwünschte Nebeneffekte mit sich.
2. Allein die Kohle könnte aufgrund ihrer bereits erprobten Nutzungstechnologien eine Alternative zur Kernenergie sein. Dem entgegen stehen neben wirtschaftlichen Problemen vor allem die ökologischen Belastungen, wobei sich die Freisetzung von $CO_2$ als ein limitierender Faktor für eine Ausweitung der Kohlenutzung erweisen könnte.
3. Gerade in der Bundesrepublik Deutschland kann die Kohle wegen der günstigen Reservesituation eher ein mittelfristiger Partner als eine Alternative zur Kernenergie sein. Dies wäre eine im Hinblick auf die Versorgungssicherheit energiepolitisch wünschenswerte Entwicklung.
4. Inwieweit Sonnenenergie einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung leisten kann, hängt von der Kostenentwicklung und der Lösung der Transport- und Speicherprobleme ab. Dies gilt insbesondere für eine Anwendung in der Bundesrepublik Deutschland. Die Umwelteffekte einer Sonnenenergienutzung scheinen weniger schwerwiegend als die der anderen Optionen zu sein, sie sind aber noch nicht vollständig analysiert.
5. Allein die Kernenergie ermöglicht wegen ihres bereits erreichten Entwicklungsstandes eine schnelle und dazu noch wirtschaftlich attraktive Substitution des Erdöls und Erdgases.
6. Die Risiken einer Kernenergienutzung sind durch technische Vorsorgemaßnahmen auf ein akzeptables Niveau reduzierbar. Die Festlegung dieses Niveaus ist letztlich eine politische Aufgabe.
7. Da jede der hier betrachteten langfristigen Energieversorgungsoptionen natürlich auch positive Effekte hat, können auch in einem gewissen Umfang unerwünschte Nebenwirkungen als tragbar angesehen werden. Letztlich entscheidend bei dieser Bewertung alternativer Energieversorgungssysteme ist die Frage, ob der gesellschaftliche Nutzen größer als der Schaden ist.

## Literatur


[1] *Grümm, H.:* Energieerzeugung und Umwelt. Atomwirtschaft. Bd. 16. 1971. Nr. 6. S. 278–288

[2] World Energy Supplies, 1971–1975, United Nations, Statistical Papers, Series J, No. 20, 1977

[3] *Häfele, W.:* Die Kernenergie in der technischen Welt der Zukunft, 1. internationale Tagung für Kernenergierecht, Karlsruhe, August 1973

[4] *Niehaus, F., Voss, A.:* Modellsimulation zur Analyse der weltweiten Energieprobleme. Die Kälte. 28. Jahrgang. 1975. Heft 3 und 4

[5] *Niehaus, F.:* Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energieerzeugung: $CO_2$ und $H^3$. Kernforschungsanlage Jülich, Jül-1165, Februar 1975
[6] *Voss, A.:* Ungenutzte umweltfreundliche Energiequellen? Elektrizitätswirtschaft. 73. Jahrgang. 1974. Heft 2
[7] *Rippon, S.:* The Rasmussen study on reactor safety. Nuclear Engineering International. December 1974
[8] *Bonka, H.:* Das natürliche Risiko; Strahlenbelastung in der Bundesrepublik Deutschland. Bild der Wissenschaft. Juni 1975. Heft 6
[9] *Bohn, Th., Oesterwind, D.:* Zukünftige Energiebedarfsdeckung und die Bedeutung der nichtfossilen und nichtnuklearen Primärenergieträger, Teil I, AGF-ASA-Studie, Frankfurt 1976
[10] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Die künftige Entwicklung der Energienachfrage und deren Deckung – Perspektiven bis zum Jahre 2000, Hannover 1976
[11] *Schmitz, K. et al.:* Die Entwicklungsmöglichkeiten der Energiewirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland – Untersuchung mit Hilfe eines dynamischen Simulationsmodells. Jül-Spez-1, Kernforschungsanlage Jülich 1977
[12] Energy: Global Prospects 1985–2000. Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies (WAES), New York. Mc. Graw-Hill 1977
[13] *Smith, I.:* Carbon dioxide and the "greenhouse effect" – an unresolved problem. Report Number ICTIS/ER 01, IEA Coal Research, London 1978
[14] *Flohn, H.:* Großräumige Beeinflussung des Klimas durch menschlichen Eingriff? In: Energie und Umwelt. Essen, Vulkan Verlag 1977
[15] *Barnert, H., Münch, E., Schulten, R.:* Der Hochtemperaturreaktor.
[16] *Heusener, G.:* Schnelle Brutreaktoren (vgl. Kap. 8)