

KfK 2707  
ASA/ZE-16/78  
Juni 1979

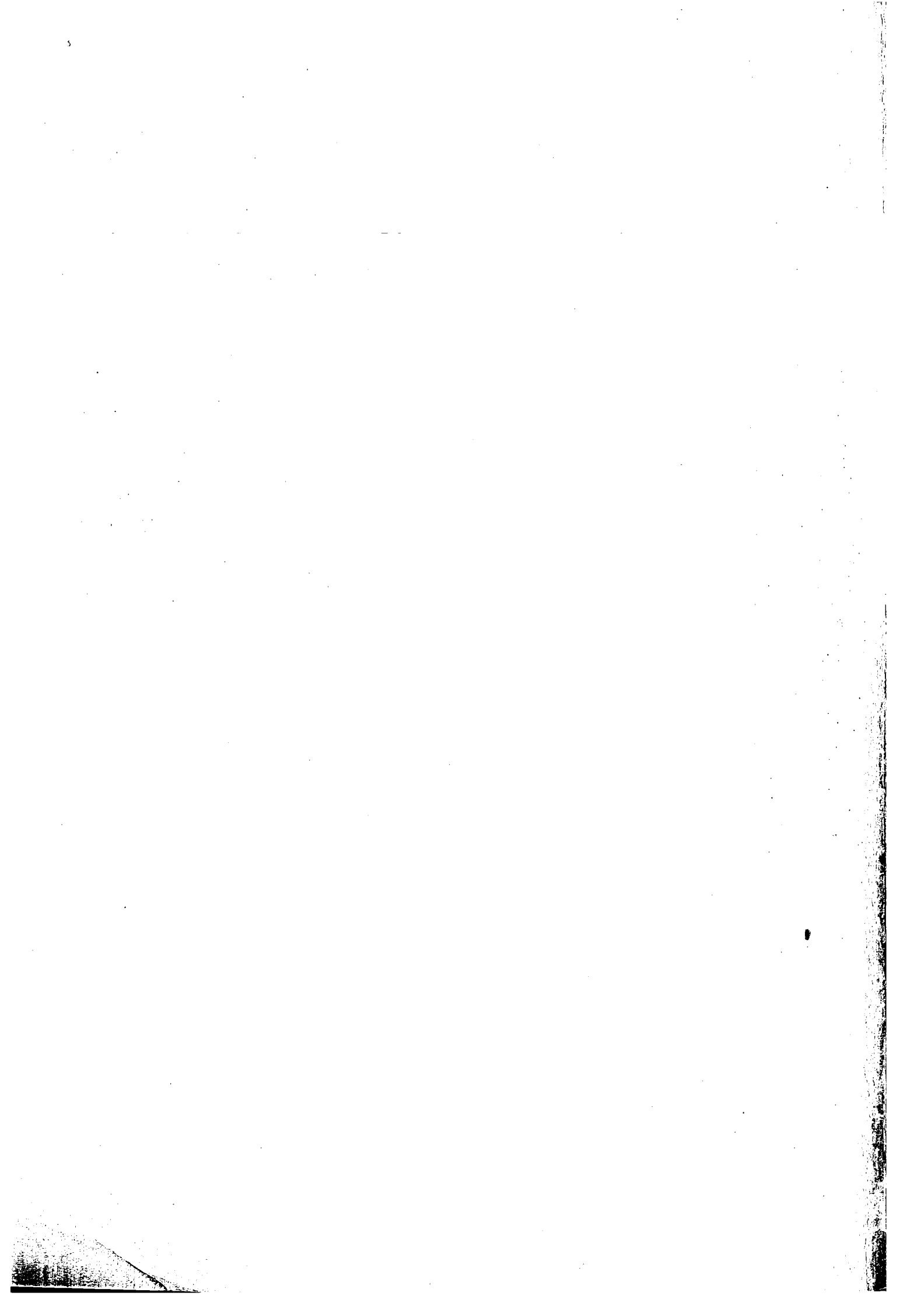
# **Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland**

**Studienleiter: H. Paschen  
Abteilung für Angewandte Systemanalyse**

## **Kurzfassung**

**R. Coenen (Hauptbearbeiter), R. Avenhaus, F. Conrad,  
P. M. Fischer, G. Frederichs, G. Halbritter, D. Wintzer**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

KfK 2707  
ASA/ZE-16/78

Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der  
Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

Studienleiter: H. Paschen

Kurzfassung

R. Coenen (Hauptbearbeiter), R. Avenhaus (IDT), F. Conrad,  
P.M. Fischer, G. Frederichs, G. Halbritter, D. Wintzer

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der  
Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland  
(Kurzfassung)

Zusammenfassung

In diesem Bericht werden die wichtigsten Ergebnisse der aus sechs Teilstudien bestehenden Studie "Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland" zusammenfassend dargestellt. Es werden behandelt:

- die zukünftigen Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen,
- Fragen der Entsorgung von Kernkraftwerken,
- wirtschaftliche Aspekte der Kernenergienutzung,
- die Umweltauswirkungen von Kernkraftwerken und Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs,
- die Problematik der Akzeptanz der Kernenergie sowie
- Fragen der Kernmaterialüberwachung.

Die Studie stellt einen Beitrag zu einer umfassenden Abschätzung der Notwendigkeit, Bedingungen und Folgen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland dar.

Consequences of Large-scale Implementation of Nuclear  
Energy in the Federal Republic of Germany  
(Summary report)

Abstract

This report is a summary presentation of the main results of the study on the "Consequences of Large-scale Implementation of Nuclear Energy in the Federal Republic of Germany" which consists of six separate volumes. The questions dealt with are:

- nuclear fuel demand and possible problems of supply,
- problems of waste management and reprocessing,
- economic aspects of nuclear energy implementation,
- environmental impacts of nuclear energy generating plants and plants of the nuclear fuel cycle,
- public acceptance of nuclear energy,
- nuclear material control.

The study is intended as a contribution to an overall assessment of the social, economic, and ecological implications of large-scale implementation of nuclear energy in the Federal Republic of Germany.



Dieser KfK-Bericht ist eine Kurzfassung der aus sechs Teilen bestehenden Studie "Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland", die unter Leitung von H. Paschen (AFAS) im Rahmen des Programms "Angewandte Systemanalyse" (ASA) der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) erstellt wurde.

Im folgenden werden die als KfK- und ASA-Berichte veröffentlichten sechs Teilstudien und die daran beteiligten Mitarbeiter aufgeführt <sup>+)</sup> :

- Teil I            Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen  
und mögliche Versorgungsprobleme bei einem großtechni-  
schen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik  
Deutschland  
H. Tangen (IT), D. Wintzer (AFAS)  
KfK 2701  
ASA/ZE-10/78
- Teil II            Fragen der Brennstoffentsorgung bei einem großtechni-  
schen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik  
Deutschland  
P.M. Fischer (Hauptbearbeiter, AFAS), W. Buschmann (DWK),  
R. Gasteiger (DWK), F.-K. Pickert (AFAS), H.-J. Zech  
(AFAS)  
KfK 2702  
ASA/ZE-11/78
- Teil III            Wirtschaftliche Fragen des großtechnischen Einsatzes der  
Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland  
D. Brune (AFAS), R. Coenen (AFAS), F. Conrad (AFAS),  
S. Klein (AFAS), H. Paschen (AFAS), H. Scheer (AFAS)  
KfK 2703  
ASA/ZE-12/78

---

<sup>+)</sup>  Erklärungen der hier verwendeten institutionellen Abkürzungen  
s. Seite III

- Teil IV            Umweltauswirkungen von Kernkraftwerken und Anlagen des  
                         kerntechnischen Brennstoffkreislaufs  
                         G. Halbritter (Hauptbearbeiter, AFAS), A. Bayer (INR),  
                         K.-R. Bräutigam (AFAS), E. Drosselmeyer (AS), U. Hagen  
                         (IGT), G. Heusener (PSB), W. Kinzelbach (LAF), E.  
                         Korthaus (ABRA), W. Kröger (KFA Jülich), E. Leßmann  
                         (AFAS), A. Müller (KFA Jülich), R. Papp (AFAS), W.M.  
                         Schikorr (AFAS), M. Schückler (INR), U. Seele (IDT),  
                         A. Seidel (IGT), G. Spannagel (IDT), H. Vossebrecher  
                         (Interatom), J. Wolters (KFA Jülich)  
                         KfK 2704  
                         ASA/ZE-13/78
- Teil V             Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie  
                         G. Frederichs (AFAS), M. Loeben (AFAS)  
                         KfK 2705  
                         ASA/ZE-14/78
- Teil VI            Kernmaterialüberwachung  
                         R. Avenhaus (Hauptbearbeiter/IDT), D. Sellinschegg (EKS)  
                         KfK 2706  
                         ASA/ZE-15/78



### III

ABRA	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Behandlung radioaktiver Abfälle
AFAS	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung für Angewandte Systemanalyse
AS	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Sicherheit
DWK	Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen
EKS	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Entwicklungsgruppe Kernmaterialsicherung
IDT	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Datenverarbeitung in der Technik
IGT	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Genetik und für Toxikologie von Spaltstoffen
INR	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
IT	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Abteilung Ingenieurtechnik
KFA Jülich	Kernforschungsanlage Jülich
LAF	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Laboratorium für Aerosolphysik und Filtertechnik
PSB	Kernforschungszentrum Karlsruhe, Projekt Schneller Brüter

G l i e d e r u n g  
 =====

Vorbemerkungen	Seite 1
----------------	------------

Teil I:

Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen und  
 mögliche Versorgungsprobleme bei einem großtechnischen  
 Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

1. Einleitung	5
2. Modellentwicklungen des großtechnischen Einsatzes der Kern- energie in der Bundesrepublik Deutschland	6
3. Produktionskapazitäten für kerntechnische Anlagen und für die Brennstoffversorgung; Uranbedarf und Uranvorräte (Bundesrepublik Deutschland)	10
4. Abschätzungen zur Entwicklung des weltweiten Uranbedarfs	16
5. Die Uranvorräte der Welt und ihre Verfügbarkeit	25

Teil II:

Fragen der Brennstoffentsorgung bei einem großtechnischen  
 Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

1. Vorbemerkung	31
2. Jährlicher und kumulierter Anfall von abgebrannten Kernbrennstoffen	34
3. Plutoniumanfall aus Leichtwasserreaktoren	40
4. Plutoniumrecycling in Leichtwasserreaktoren	43
5. Lagerbeckenbedarf für abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren	43

	Seite
6. Bedarf an Wiederaufarbeitungskapazität für abgebrannten Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren	45
7. Bedarf an Wiederaufarbeitungskapazität für bestrahlten Kernbrennstoff aus Schnellen Brutreaktoren	55
8. Bedarf an Wiederaufarbeitungskapazität für bestrahlten Kernbrennstoff aus Hochtemperaturreaktoren	55
9. Mengenanfall von radioaktivem Abfall aus den Wiederaufarbeitungsanlagen	55
10. Anzahl der Transporte zur Wiederaufarbeitungsanlage und der benötigten Transportbehälter	59

### Teil III:

#### Wirtschaftliche Fragen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

1. Einführung	62
2. Kernenergienutzung bei Verwirklichung wirtschafts- und energiepolitischer Hauptziele	62
2.1 Kernenergieeinsatz bei Vollbeschäftigung	63
2.2 Kernenergieeinsatz bei zuverlässiger und umweltschonender Energieversorgung	69
3. Versorgungs- und Beschäftigungsprobleme des verzögerten Kernenergieeinsatzes	86
3.1 Kernkraftwerksmangel und seine Problematik für die Stromversorgung	86
3.2 Beschäftigungspolitische Effekte eines verzögerten Kernenergieausbaus	91
4. Wirtschaftlichkeit von Kernkraftwerken	97
5. Finanzierungsfragen des Kernenergieausbaus	103
6. Chancen und Probleme des Exports kerntechnischer Anlagen	107

Teil IV:Umweltauswirkungen der Anlagen des kerntechnischen  
Brennstoffkreislaufs

1.	Überblick	112
2.	Vergleich der Strahlenbelastung durch verschiedene Reaktorsysteme	114
3.	Organspezifische Strahlenbelastung durch Radionuklidemissionen aus Kohlekraftwerken	131
4.	Biologische Strahlenwirkung auf den menschlichen Organismus	139
5.	Schlußfolgerungen	147

Teil V:Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie

1.	Problemaufriß und Aufgabenstellung	149
2.	Zur historischen Entwicklung der Kernenergiekontroverse	149
3.	Die Risiken der Kernenergie in der öffentlichen Diskussion	151
4.	Erklärungsansätze für die Akzeptanzproblematik der Kernenergie	152
5.	Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie aus politischer Sicht	153
6.	Entwicklungstendenzen der Kernenergieopposition	157

<u>Teil VI:</u>	Seite
<u>Kernmaterialüberwachung</u>	
1. Einleitung	160
2. Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen	160
3. Das Modellabkommen der IAEA	162
4. EURATOM-Kontrollen	164
5. Offene Fragen	165
Literaturverzeichnis	167



## Vorbemerkungen

Die Studie "Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland" wurde von der Abteilung für Angewandte Systemanalyse (AFAS) des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK) in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern aus mehreren anderen Instituten und Abteilungen des KfK sowie aus der Kernforschungsanlage Jülich (KFA) und weiteren externen Institutionen erstellt. Sie ist Teil des Programms "Angewandte Systemanalyse" (ASA) der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF).

Die Gesamtstudie setzt sich aus sechs Teilstudien zusammen, in denen

- die zukünftigen Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen,
- Fragen der Entsorgung von Kernkraftwerken,
- wirtschaftliche Aspekte der Kernenergienutzung,
- die Umweltauswirkungen von Kernkraftwerken und Anlagen des nuklearen Brennstoffkreislaufs,
- die Problematik der Akzeptanz der Kernenergie sowie
- Fragen der Kernmaterialüberwachung

untersucht werden.

Schon diese grobe Themenübersicht macht deutlich, daß die Studie nicht auf die Analyse von Konsequenzen des Kernenergieeinsatzes im Sinne von Anwendungsfolgen (z.B. Umweltauswirkungen) beschränkt wurde. Vielmehr werden auch Konsequenzen erörtert, die - im Sinne zu schaffender Voraussetzungen - aus der Entscheidung für einen Einsatz der Kernenergie im großen Maßstab resultieren, zum Beispiel im Hinblick auf die Bereitstellung von Entsorgungskapazitäten. Außerdem werden, über eine Kon-

sequenzenanalyse hinausgehend, auch die Fragen der ökonomischen Notwendigkeit und der Wirtschaftlichkeit des Kernenergieeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland sowie die Folgen eines verzögerten Einsatzes der Kernenergie analysiert. Eine Erweiterung der Konzeption der Studie auf diese zunächst nicht vorgesehenen Fragestellungen wurde als notwendig angesehen, da diese Fragen im Verlaufe der politischen Diskussion um die Kernenergie zunehmend an Gewicht gewonnen haben. Eine Analyse der Akzeptanzproblematik erschien sinnvoll, weil diese zu einer entscheidenden Restriktion für einen großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik werden könnte.

Andererseits weist die mit dieser Studie vorgelegte Analyse über Notwendigkeit, Bedingungen und Folgen des Kernenergieausbaus noch eine Reihe von Lücken auf, deren Schließung weitere Forschungsarbeiten erfordert. Zu den Fragen, die in der Studie nicht oder nicht in der erforderlichen Tiefe behandelt werden konnten, gehören vor allem die Analyse der möglichen gesellschaftlichen Auswirkungen des weiteren Ausbaus der Kernenergie, wie sie zur Zeit unter den Schlagworten "Plutonium-Wirtschaft" und "Atomstaat" öffentlich diskutiert werden; die Problematik der Weiterverbreitung von Kernwaffen, insbesondere im Zusammenhang mit der Ausfuhr von Nukleartechnologien; eine regionsspezifische Gesamtanalyse der ökologischen Auswirkungen eines großtechnischen Einsatzes der Kernenergie; und die Störfallrisiken kerntechnischer Anlagen. Die drei zuerst genannten Problemkreise sind Gegenstand laufender Forschungsvorhaben der AFAS. Die potentiellen Strahlenbelastungen bei Störfällen sind Thema spezieller Risikostudien, die an anderer Stelle durchgeführt werden.

Im folgenden sei kurz der Aufbau der Gesamtstudie dargestellt:

Den Ausgangspunkt der Untersuchung bilden drei Szenarien über die mögliche langfristige Entwicklung (bis 2050) des Kernenergieeinsatzes in der Bundesrepublik Deutschland, die im Teil I dargestellt und begründet werden. Für diese alternativen "Modellent-



wicklungen" werden in weiteren Abschnitten des Teils I der Bedarf an Kernbrennstoffen ermittelt und dessen Deckungsmöglichkeiten auf dem Hintergrund der möglichen Entwicklung der weltweiten Urannachfrage und der Ressourcensituation analysiert.

Teil II enthält Berechnungen über den Anfall von bestrahlten Kernbrennstoffen für die alternativen Szenarien des Teils I sowie Abschätzungen des entsprechenden Bedarfs an Entsorgungskapazitäten.

Teil III beschäftigt sich mit wirtschaftlichen Fragen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie. Zunächst wird der zukünftige Bedarf an Kernenergie für eine zeitliche Perspektive bis zum Jahre 2000 im Rahmen von Modelldarstellungen der Energieversorgung bei Verwirklichung gesamtwirtschaftlicher Zielsetzungen begründet. Ausgehend von der gegenwärtig hinter den Planungen zurückbleibenden Kernenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland werden dann Möglichkeiten zur Verhinderung von Stromversorgungsengpässen diskutiert und Folgeprobleme eines verzögerten Kernenergieeinsatzes für die Beschäftigungssituation analysiert. Teil III enthält weiterhin einen Vergleich der Kosten der Kohle- und Kernstromerzeugung, eine Analyse der Finanzierungsprobleme des Kernenergieausbaus sowie eine Analyse der Bedeutung des Exports kerntechnischer Anlagen für die deutsche kerntechnische Industrie und die Volkswirtschaft insgesamt.

In Teil IV werden die Umweltauswirkungen durch Kernkraftwerke und Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufs behandelt. Dabei war es, wie schon angedeutet, aus verschiedenen Gründen (z.B. Fehlen einer umfassenden Standortplanung) noch nicht möglich, die Folgenabschätzungen auf die in Teil I entwickelten Szenarien zu basieren. Untersucht wird die Strahlenbelastung durch die Emissionen kerntechnischer Anlagen bei Normalbetrieb (anlagenspezifisch, regionsspezifisch, global). Weiterhin enthält dieser Teil Berechnun-

gen über die organspezifische Strahlenbelastung aus den Emissionen von Kohlekraftwerken. Schließlich werden die Grundlagen für die Ermittlung der biologischen Strahlenwirkung, die Abwärmebelastungen aus energieerzeugenden Anlagen sowie die Gefahrenpotentiale bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt und erörtert.

In Teil V werden Entstehung und Ursachen der Kernenergiekontroverse analysiert (Akzeptanzproblematik), von deren weiterer Entwicklung der Umfang und die Geschwindigkeit des weiteren Ausbaus der Kernenergie mit abhängen werden.

Teil VI befaßt sich mit Problemen der Kernmaterialüberwachung, wobei schwerpunktmäßig Entwicklung, technisch-organisatorischer Stand und offene Fragen der Spaltstoffflußkontrolle behandelt werden.

In diesem Bericht wird über die wichtigsten Ergebnisse dieser sechs Teilstudien berichtet.

# I. Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen und mögliche Versorgungsprobleme bei einem großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

## 1. Einleitung

Die Kernenergie hat gegenwärtig einen bescheidenen Anteil am Primärenergieeinsatz in der Bundesrepublik Deutschland (3 % 1977).

Die Frage nach den Konsequenzen eines großtechnischen Einsatzes der Kernenergie ist die Frage nach den Konsequenzen einer Entwicklung, in der die Kernenergie zunehmend größere Anteile einer wachsenden Primärenergienachfrage übernimmt. Die dabei in Betracht kommende Spanne für den möglichen Umfang des Kernenergieeinsatzes ist langfristig sehr groß. Den quantitativen Analysen der Teile I und II dieser Studie liegen ausgewählte Modellentwicklungen zugrunde, die in Abschnitt 2 erläutert werden.

In Abschnitt 3 wird näher auf technisch bedingte Anforderungen an den Versorgungsteil des Brennstoffkreislaufs für die ausgewählten Modelle eingegangen. Längerfristige Begleitumstände der Bedarfsdeckung werden diskutiert.

Innerhalb des Versorgungsteils ist für die Bundesrepublik Deutschland die Frage nach den langfristigen Bedingungen des Uranimports von besonderer Bedeutung. Diese können nur im Rahmen der internationalen Entwicklung der Urannachfrage und der Ressourcensituation beurteilt werden. Auf solche Entwicklungen wird deswegen in den Abschnitten 4 und 5 dieses Beitrages eingegangen.

## 2. Modellentwicklungen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

### Primärenergienachfrage

Einige Fragen, die in der Studie behandelt werden, erfordern einen Zeit-horizont, der weit in das nächste Jahrhundert reicht. Aussagen darüber, auf welchen Umfang der Kernenergieeinsatz langfristig wachsen kann, sind nur vor dem Hintergrund von Vorstellungen über die langfristige Entwicklung der Primärenergienachfrage möglich. Dabei wird von folgenden Einschätzungen ausgegangen:

- die Energiepreise werden längerfristig überdurchschnittlich wachsen;
- die Wirtschaft und private Aktivitäten werden sich in ihrer Struktur in Richtung auf geringere Energieintensität ändern;
- das Bruttosozialprodukt wird nicht exponentiell, sondern mit tendenziell sinkenden jährlichen Wachstumsraten ansteigen.

Diese Einschätzungen führen zur Annahme ständig sinkender Zuwachsraten der Primärenergienachfrage. Der in Abb. I-1 dargestellten Bandbreite des Primärenergiebedarfs liegt ein Anwachsen des Pro-Kopf-Verbrauchs der Bevölkerung von 5,6 kW<sub>th</sub> (1977) über 8 bis 11 kW<sub>th</sub> (2000) auf 10 bis 20 kW<sub>th</sub> (nach 2050) zugrunde (Vergleichszahl für die USA 10,7 kW<sub>th</sub> pro Kopf im Jahre 1974).

Orientierungszahlen für das dabei mögliche Wirtschaftswachstum<sup>+) sind: Für die Zeit von 1975 bis 1985 durchschnittlich etwa 3 %/a bis 4,5 %/a, danach bis 2000 durchschnittlich etwa 2 %/a bis 3 %/a.</sup>

---

+) Dabei ist unterstellt, daß das Primärenergiewachstum in den nächsten 20 Jahren um 1 %/a hinter dem Wirtschaftswachstum zurückbleibt.

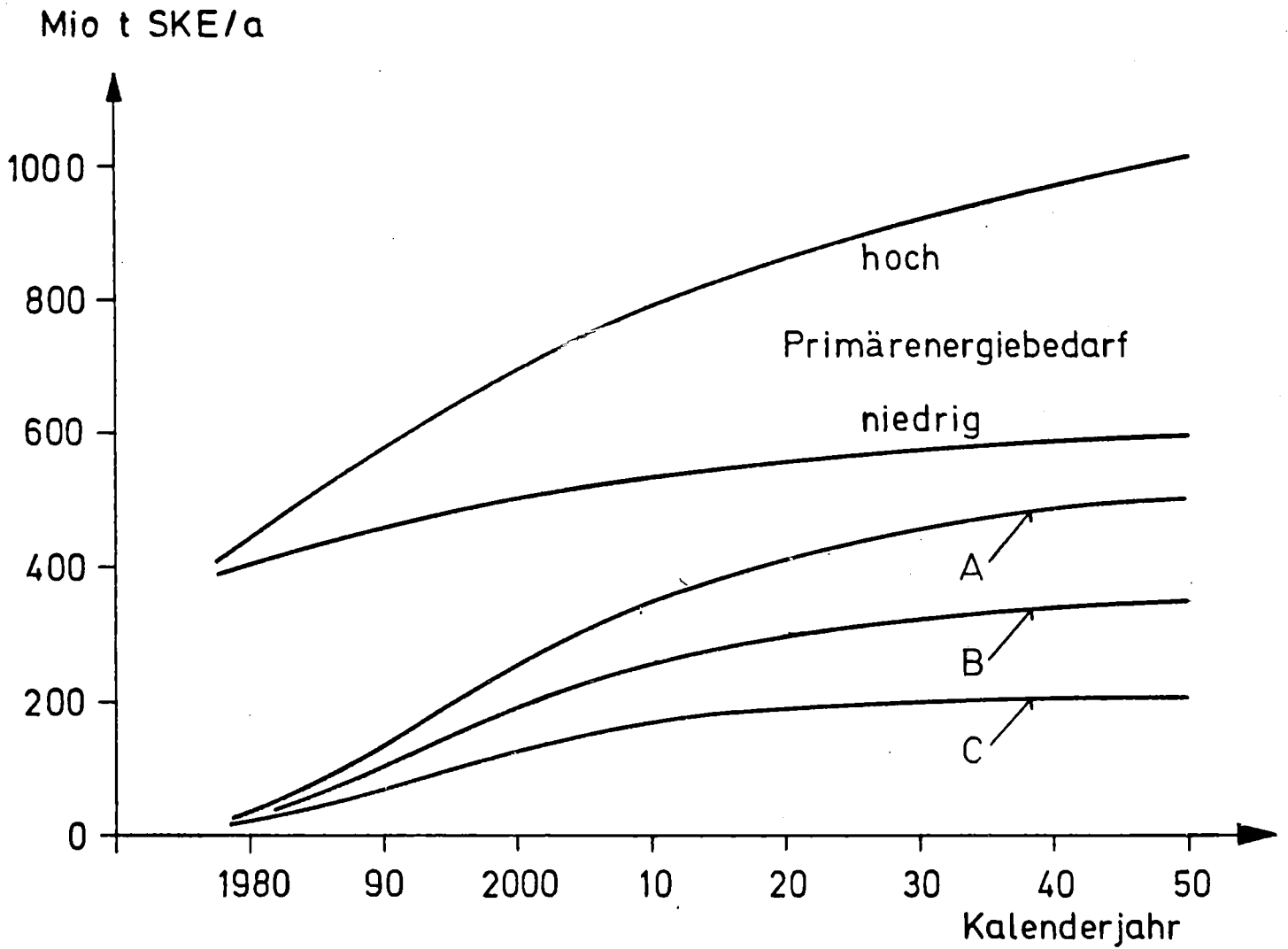


Abb. I-1: Erwartbarer Primärenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland sowie Kernenergiemodelle A, B und C

## Modelle des Kernenergieeinsatzes

Hinsichtlich des künftigen Beitrags der Kernenergie zur Primärenergieversorgung der Bundesrepublik Deutschland werden exemplarisch 3 Fälle (die Modelle A, B und C) untersucht, die in Abb. I-1 mit eingezeichnet sind. Einige Erläuterungen dazu werden nachfolgend in Form von Szenarien gegeben.

### Szenario für Modell A

Kernenergie findet rasch zunehmende Akzeptanz. Technische Rückschläge sind gering. Genehmigungsverfahren werden schon in den nächsten Jahren deutlich beschleunigt, bald standardisiert. Der Einsatz von Kohle zur Stromerzeugung nimmt schon vor 2000 merklich ab. Die Primärenergienachfrage liegt im oberen Bereich der in Abb. I-1 dargestellten Bandbreite. Der Stromanteil an der Endenergie steigt langfristig auf 30 % bis 35 %. Die Kernenergie übernimmt einen bis auf 70 % oder 80 % wachsenden Anteil an der Stromerzeugung. Kernenergie wird bereits um 2000 in nennenswertem Umfang für nichtelektrische Endenergie genutzt und übernimmt im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts 20 % bis 30 % der nichtelektrischen Endenergie.

### Szenario für Modell B

Hier wurden Verhältnisse angenommen, die zwischen denen der Szenarien A und C liegen. Die Situation hinsichtlich Akzeptanz, Genehmigspolitik, technischen Fortschritten bei der Schließung des Brennstoffkreislaufs, der Entwicklung der Stromnachfrage, des Umfangs der Kohleverstromung und anderer Einflußgrößen führt dazu, daß in den nächsten 10 Jahren im Jahresdurchschnitt etwa 4 Kraftwerksprojekte (Leichtwasserreaktoren) bis zum Baubeginn gebracht werden. Die installierte Kernenergiekapazität steigt auf 25 GW<sub>e</sub> 1985 und 85 GW<sub>e</sub> im Jahre 2000. Die Primärenergienachfrage bewegt sich langfristig im mittleren oder unteren Bereich der be-

schriebenen Bandbreite. Der Stromanteil an der Endenergie steigt bis auf 25 % oder 30 %, die Kernenergie übernimmt davon schließlich 70 %. Die installierte Kernenergiekapazität steigt langfristig auf etwa 500 GW<sub>th</sub> (äquivalent zu 200 GW<sub>e</sub>).

### Szenario für Modell C

Widerstände gegen die Kernenergie setzen sich fort, führen aber nicht zu krassen Entscheidungen gegen die Kernenergie. Neue Errichtungsgenehmigungen werden zögernd erteilt. Die installierte Kernenergiekapazität beträgt 18 GW<sub>e</sub> in 1985 und 57 GW<sub>e</sub> im Jahre 2000. Die Primärenergienachfrage bewegt sich in der Nähe der unteren Grenze des betrachteten Bandes. Der Stromanteil an der Endenergie steigt nur auf etwa 20 %. Die Kernenergie übernimmt davon langfristig 60 %. Von der nichtelektrischen Endenergie übernimmt die Kernenergie ca. 15 % im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts, z.B. in Form von Prozeß- und Fernwärme.

### Bemerkungen zu den Modellen

Die Modelle A und C sind nicht im prognostischen Sinne als Maximal- bzw. Minimalschätzungen zu verstehen. Rein technisch gesehen könnte die Kernenergie langfristig in größerem Umfang in den nichtelektrischen Bereich eindringen als für Modell A veranschlagt wurde. Bis 1990 ist Modell A praktisch nicht mehr zu realisieren. Modell C entspricht am ehesten heute erkennbaren Tendenzen bei wichtigen Einflußgrößen. Denkbare Kernenergieentwicklungen deutlich unterhalb des Modells C sind kaum noch repräsentativ für einen großtechnischen Einsatz, der hier Untersuchungsgegenstand ist.

In diesem Jahrhundert werden kommerziell überwiegend Leichtwasserreaktoren eingesetzt. Bei dem betrachteten Kernenergieeinsatz wird es längerfristig erforderlich sein, den Uranbedarf durch Einführung von Brutreaktoren oder

Nahebrütern zu senken. Wie rasch das geschehen kann, hängt vom Einführungszeitpunkt und der Einführungsgeschwindigkeit für die uransparenden Reaktortypen ab.

Den in Abb. I-2 mit eingetragenen Kurven für die kommerzielle Installation uransparender Reaktortypen ab 2000 (A 2, B 2, C 2) liegt die Annahme zugrunde, daß die Einführungsgeschwindigkeiten der uransparenden Reaktoren etwa mit den Modellkurven für die Leichtwasserreaktor-Kapazität zwischen 1970 und 1980 übereinstimmen.

### 3. Produktionskapazitäten für kerntechnische Anlagen und für die Brennstoffversorgung; Uranbedarf und Uranvorräte (Bundesrepublik Deutschland)

#### Erstellungskapazitäten für Reaktoren

Die gegenwärtige Erstellungskapazität in der Bundesrepublik Deutschland beträgt etwa 8 GW<sub>e</sub>/a. Sie würde zur Ausweitung der installierten Reaktorkapazität und zum Ersatz von Reaktoren nach Ablauf ihrer Lebensdauer für Modell B auch langfristig zur Deckung des Inlandsbedarfs ausreichen. Für Modell C bestehen auch langfristig Exportreserven. Für Modell A müßte die Baukapazität im Verlaufe der Zeit etwas erweitert werden.

#### Brennelementfabrikation

Die Fabrikationskapazität für LWR<sup>+)</sup>-Brennelemente betrug 1975 in der Bundesrepublik Deutschland 670 t SM<sup>++)</sup>/a. Im Beispiel des Modells B

---

+) LWR: Leichtwasserreaktor

++) SM: Schwermetall (Brennstoff + Brutstoff)



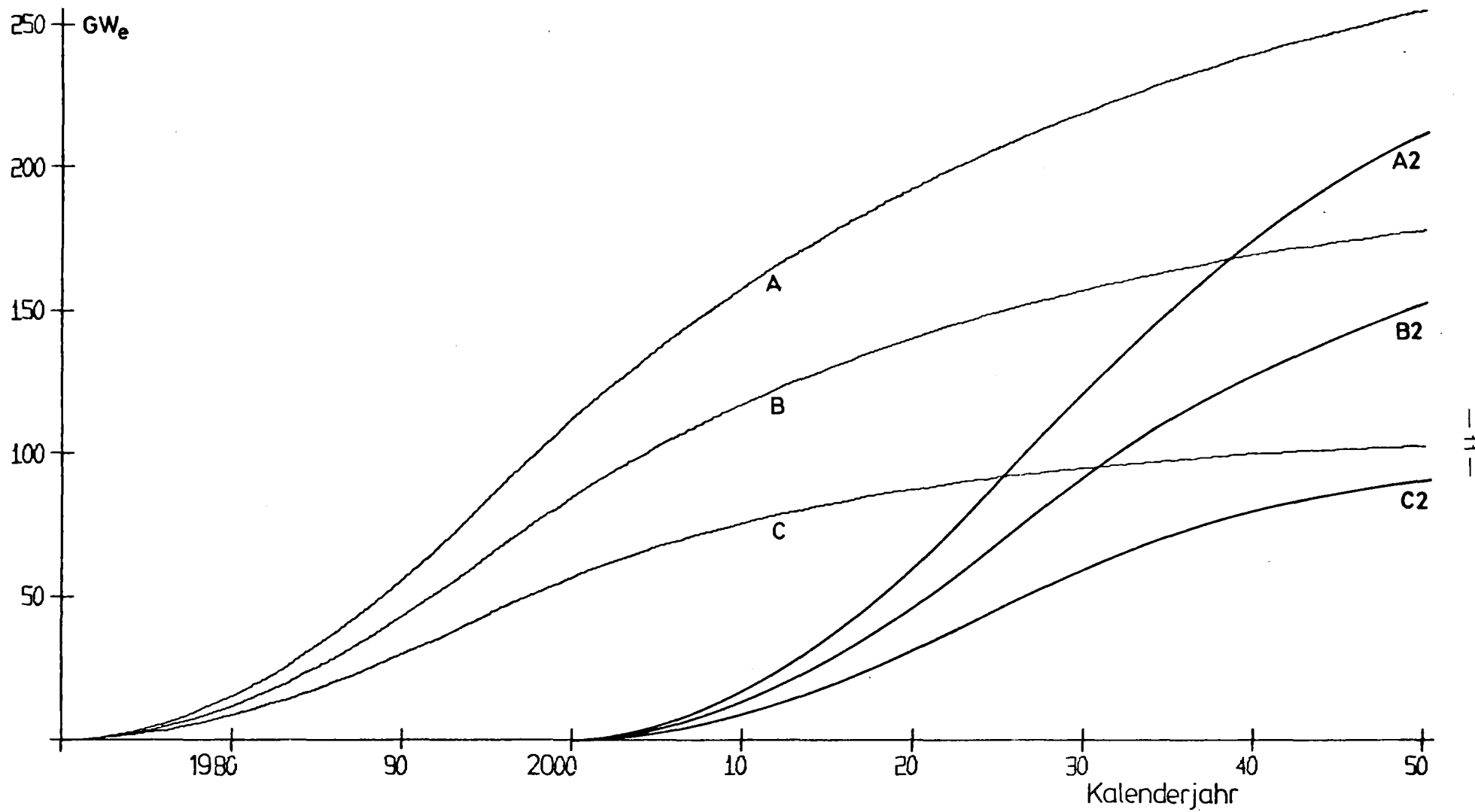


Abb. I-2: Installierte Kraftwerkskapazität - Modelle A, B, C und Beitrag uransparender Reaktortypen ab 2000

steigt die erforderliche Fabrikationskapazität für LWR-Brennelemente über 1050 t SM/a (1985) auf ein Maximum von 2900 t SM/a (2010) und sinkt bereits 2030 auf 1700 t SM/a, wenn uransparende Reaktoren im Jahre 2000 eingeführt werden. Die Maximalwerte (um 2010) der Modelle A und C liegen bei 4000 t SM/a bzw. bei 1850 t SM/a.

Eine zeitliche Verzögerung des Einführungszeitpunktes um 5 Jahre würde den maximalen Fabrikationsbedarf um etwa 15 % erhöhen.

Die Fabrikationstechnologie für LWR-Brennelemente ist auch in der Bundesrepublik Deutschland kommerziell eingeführt. Die Industriekapazität dürfte sich ohne große Schwierigkeiten einer nach den Modellen wachsenden Nachfrage anpassen können.

Die Entwicklung der Fabrikation von Brennelementen aus Rückführbrennstoff mit Plutonium oder U-233 zum Einsatz in uransparenden Reaktoren wird dagegen noch erhebliche Zeit bis zur kommerziellen Reife benötigen.

Für den Fall der Einführung von Schnellen Brutreaktoren (SBR) lassen sich die Verhältnisse am Beispiel des Modells B für den Einführungszeitpunkt 2000 so verdeutlichen:

Bei inländischer Fabrikation von Brüterbrennstoff reicht die kleintechnische Kapazität einer Prototypanlage zur Fabrikation von etwa 20 t SM/a für Core-Brennstoff plus Brütstoff für axialen und radialen Brutmantel aus, um Demonstrationsbrüter mit einer Kapazität von 1,5 GW<sub>e</sub> (z.B. SNR 300 plus SNR 2) mit Brennelementen für Nachladungen zu versorgen. Diese Kapazität müßte bereits 5 Jahre nach dem Einführungszeitpunkt auf 200 t SM/a erhöht sein und damit rasch in großtechnische Dimensionen gelangen. Mengenmäßig ist das immer noch wesentlich weniger als die dann erforderliche Fabrikation von Brennstoff für Leichtwasserreaktoren. Jedoch stellt der Core-Brennstoff für SBR - wie auch der Rückführbrennstoff von Hoch-

temperaturreaktoren (HTR) - erhebliche Strahlenschutzanforderungen bei der Fabrikation.

Bei 200 t SM/a müßten täglich rd. 300 kg Corebrennstoff fabriziert und über 30 kg spaltbares Plutonium verarbeitet werden. Langfristig würde sich diese Menge auf 220 kg Pu/d (Modell C), auf 420 kg Pu/d (Modell B) bzw. auf 630 kg Pu/d (Modell A) erhöhen.

Damit sind zugleich erhebliche Anforderungen an Maßnahmen gegen den Mißbrauch von Spaltstoff gestellt. Solche Anforderungen bestehen in ähnlicher Weise für das HTR-Vorbrüter-Nahebrüter-System.

### Trennarbeit

Die für Leichtwasserreaktoren der Bundesrepublik Deutschland erforderliche Anreicherung des Natururans an U-235 wird zumindest bis 1990 überwiegend in ausländischen Anlagen erfolgen. Nach /JAEK, W., u.a. (1977)/ liegen für den Zeitraum von 1978 bis 1990 vertragliche Absicherungen zur Versorgung mit Trennarbeit in Höhe von 35 000 t UTA<sup>+</sup>) vor. Für Modell C würde die abgesicherte Trennarbeit den vollen Bedarf bis über 1990 hinaus decken. Für Modell B wären bereits 87 % des Bedarfs bis 1990 abgesichert. Für das HTR-Nahebrütersystem /SCHULTEN, R., u.a. (1977)/ wird Uran benutzt, in dem U-235 auf 93 % angereichert ist. Wegen des damit verbundenen Proliferationsproblems dürfte entsprechende Trennarbeit auf dem internationalen Markt schwerer beschaffbar sein als für Leichtwasserreaktoren, die mit Anreicherungen um 3 % auskommen. Der Schnelle Brutreaktor kommt ohne angereichertes Uran und damit ohne Trennarbeit aus.

---

<sup>+</sup>) UTA: Urantrennarbeitseinheit, gewöhnlich in kg oder in t angegeben.

Für die Uran-Lieferländer ist es wirtschaftlich attraktiv, Uran gleich in angereicherter Form zu verkaufen. Inwieweit die Trennarbeitskapazität künftig dem nationalen Bedarf und Exportinteressen angepaßt werden kann, hängt auch vom Ausgang internationaler Beratungen (INFCE) über Maßnahmen gegen die Verbreitung von Kernwaffen ab.

### Uranbedarf

Gegenwärtig (1978) liegt der jährliche Bedarf bei 1000 t  $U_{\text{nat}}$  pro Jahr (ohne Rückführung). Bei dem exemplarisch ausgewählten Modell B wächst er bis auf etwa 14 000 t  $U_{\text{nat}}$  in 2010 (ca. 10 Jahre nach Einführung uransparender Reaktoren, vgl. Abb. I-3), wenn U-235 zurückgeführt wird. Die entsprechenden Maximalwerte für den LWR-Uranbedarf liegen für die Modelle A und C bei 20 000 t  $U_{\text{nat}}$ /a bzw. bei 8000 t  $U_{\text{nat}}$ /a. Ohne Einführung uransparender Reaktoren würde der jährliche Uranbedarf für LWR ständig ansteigen und bei zeitlicher Summierung bis zum Jahre 2100 zu 1,5 Mio t  $U_{\text{nat}}$  (Modell C) bzw. 4,2 Mio t  $U_{\text{nat}}$  (Modell A) führen. Bei Einführung von Brutreaktoren ist eine Verringerung des zeitlich summierten Uranbedarfs auf 20 % bis 25 %, bei Einführung von HTR-Nahebrütersystemen auf etwa 40 % der genannten Zahlenspannen möglich. Der jährliche Natururanbedarf für vollausgebaute Systeme beträgt für das Beispiel Modell B (200  $GW_e$ ) im LWR-Fall ca. 20 000 t<sup>+</sup>, im HTR-Nahebrüter-Fall ca. 2800 t (plus ca. 200 t Thorium<sup>++</sup>) und im SBR-Fall ca. 300 t<sup>++</sup>). Im SBR-Fall handelt es sich um einen Brutstoffbedarf, für den auch abgereichertes Uran aus Trennanlagen genutzt werden kann.

---

+ ) Bei Rezyklierung von Resturan und Plutonium

++ ) Bei Rezyklierung von Brut- und Spaltstoff

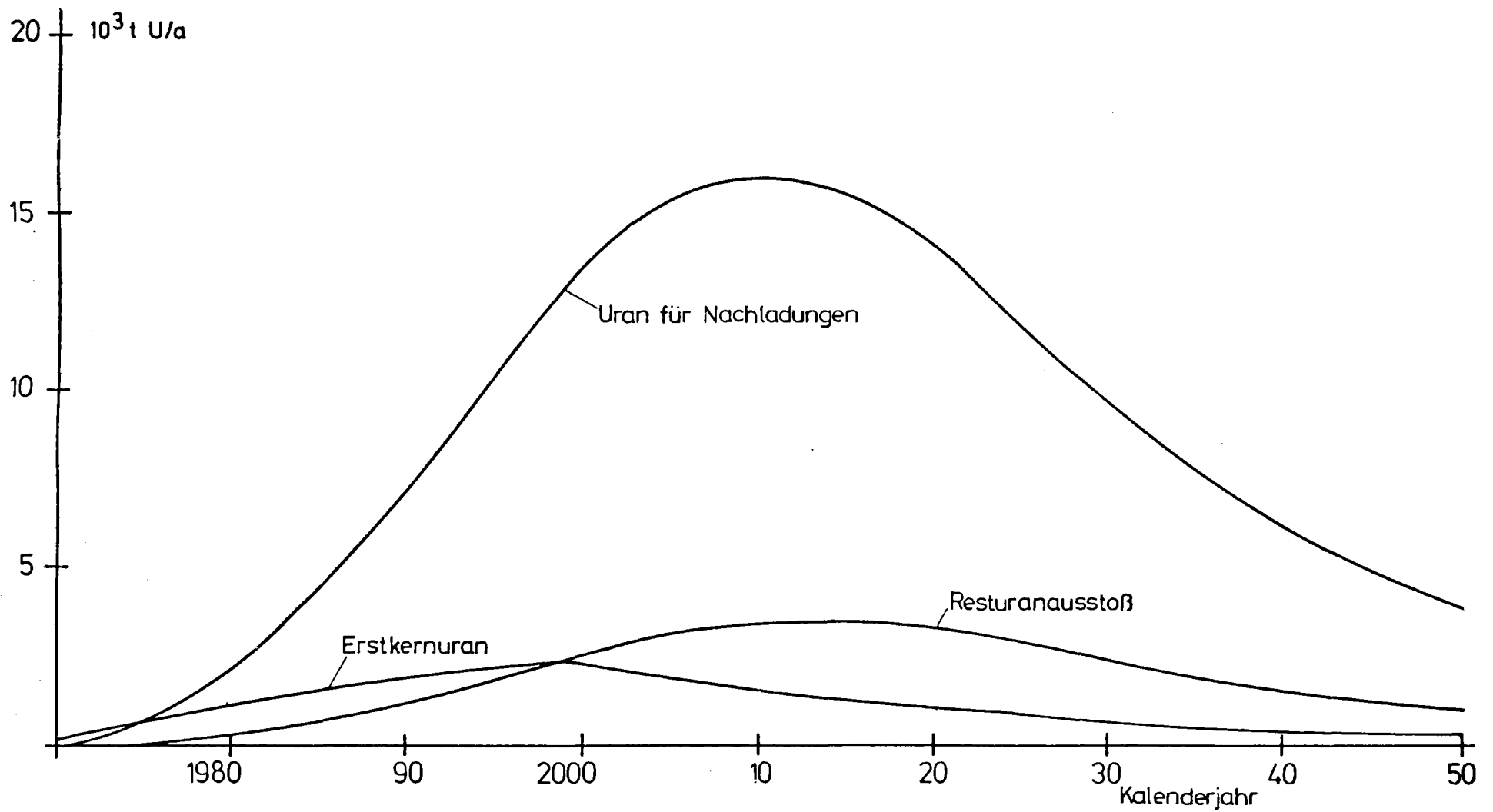


Abb. I-3: Uranbedarf und Resturanausstoß für LWR-Modell B2

### Vergleich des Uranbedarfs mit den Uranvorräten

Die mit rd. 20 000 t U zu veranschlagende Summe aus einigermaßen gesicherten, zusätzlich vermuteten und "prognostischen" Vorräten<sup>+</sup>) wirtschaftlich gewinnbarer Uranvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland kann nur einige Prozent des zeitlich summierten Bedarfs abdecken. Ein einziger Leichtwasserreaktor gegenwärtiger Bauart (1,3 GW<sub>e</sub>) braucht in 30 Jahren rd. 5000 t Natururan, d.h. mehr als die gesicherten Reserven der Bundesrepublik Deutschland. Die Urangewinnung in der Bundesrepublik betrug im Durchschnitt der letzten 3 Jahre weniger als 50 t U pro Jahr.

Solange nicht uransparende Reaktortypen vorherrschen, wird die Bundesrepublik Deutschland ganz überwiegend auf Uranimporte angewiesen sein. Auch die übrigen westeuropäischen Länder (vielleicht mit Ausnahme Frankreichs) werden vermutlich in starkem Maße von Uranimporten abhängen.

Mögliche Versorgungsprobleme der Bundesrepublik Deutschland sind vor dem Hintergrund des weltweiten Uranbedarfs und der zugehörigen Ressourcenbasis zu sehen.

#### 4. Abschätzungen zur Entwicklung des weltweiten Uranbedarfs

##### Der Umfang der künftigen Kernenergienutzung

Entscheidend für die Abschätzungen in diesem Abschnitt ist die Annahme, daß Bevölkerung und Pro-Kopf-Einsatz an Primärenergie nicht ständig wachsen

---

<sup>+</sup>) Vgl. S. 25 zur Definition der Vorratsklassen

werden. Der Zeithorizont wurde bis 2100 gewählt, um Abschätzungen zum zeitlich summierten Uranbedarf nicht in der Aufbauphase der Kernenergie abrechnen zu müssen. Im einzelnen wurden folgende Annahmen getroffen, die der Abb. I-4 zugrundeliegen:

- Die Weltbevölkerung wird sich deutlich erhöhen: Von gegenwärtig etwas über 4 Mrd Menschen auf etwa 6 Mrd Menschen im Jahre 2000 und auf 8 bis 15 Mrd Menschen im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts.
- Die Bandbreite für das Jahr 2000 bedeutet gegenüber 1975 ( $2 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{cap}$ ) eine Steigerung des durchschnittlichen Pro-Kopf-Einsatzes um etwa 25 % bis 50 %. Sie entspricht im mittleren und oberen Bereich Schätzungen, die 1977 von internationalen Gruppen veröffentlicht wurden.
- Der durchschnittliche Pro-Kopf-Einsatz an Primärenergie wird auch im Verlaufe einiger Generationen den gegenwärtigen USA-Einsatz pro Kopf nicht erreichen, aber etwas über dem gegenwärtigen Wert für die Bundesrepublik Deutschland liegen (obere Grenze des Bedarfsbandes in Abb. I-4).
- Untere Grenze des Bedarfsbandes: Die Weltbevölkerung läßt sich auf etwa 8 Mrd Menschen begrenzen, der durchschnittliche Pro-Kopf-Einsatz an Primärenergie steigt nur um einen Faktor 2 gegenüber 1975.
- Kernenergiekapazität im Jahre 2000:  $1540 \text{ GW}_e$  (gemäß Schätzungen in /World Energy Conference (1977)/).
- Kernenergiekapazität im Jahre 2050:  $5000 \text{ GW}_e$  (d.h. je nach Höhe des Primärenergiebedarfs zwischen 20 % und 40 % des Primärenergiebedarfs).

Die Annahmen bedeuten, daß Kohle und regenerative Energieträger im nächsten Jahrhundert in zunehmendem Maße Erdöl und Erdgas substituieren und darüber hinaus einen Teil des Wachstums der Primärenergienachfrage übernehmen müßten.

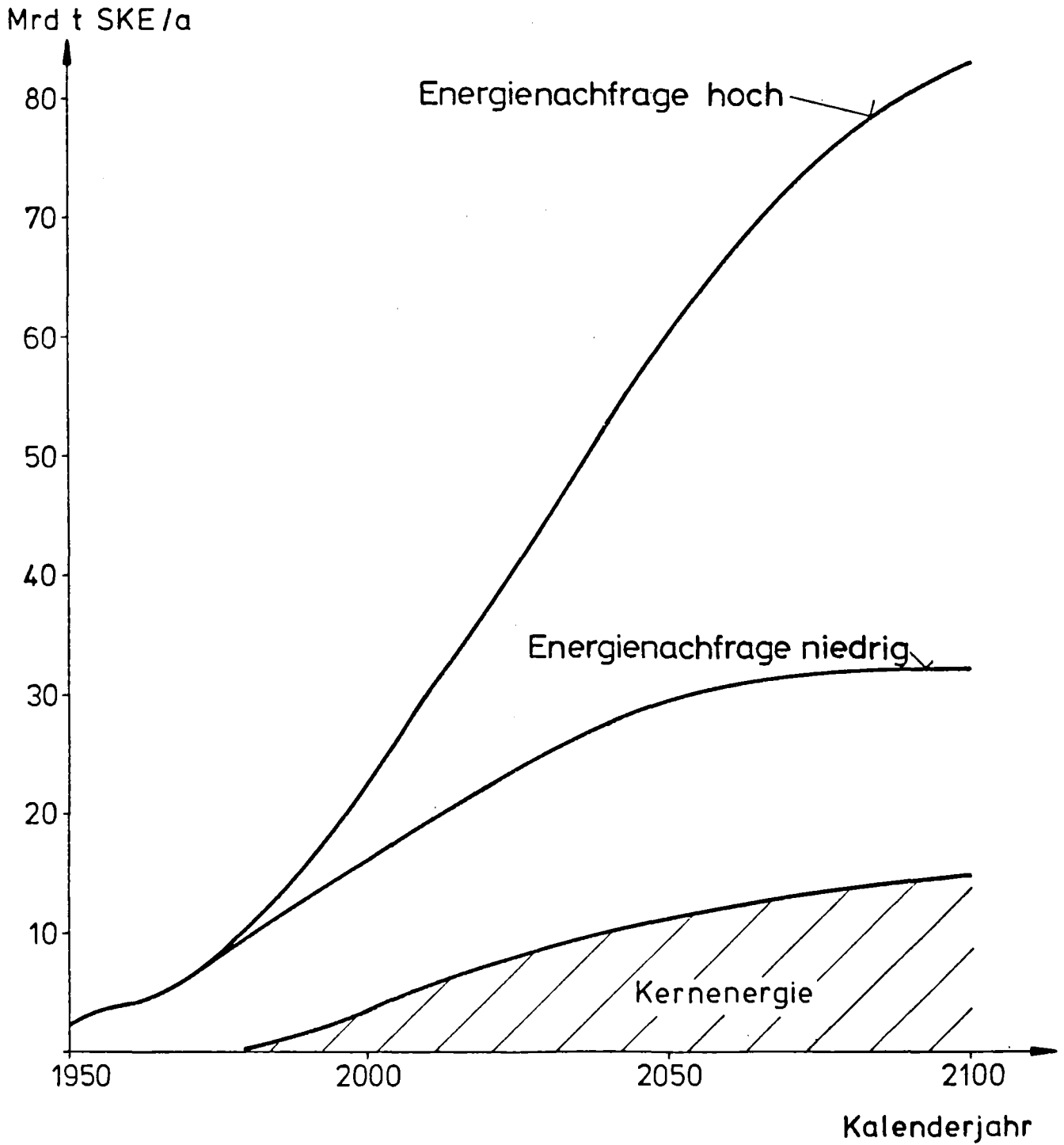


Abb. I-4: Kernenergieeinsatz weltweit (Modell) und Primärenergienachfrage



Ein rascherer Ausbau der Kernenergie<sup>+)</sup> , als hier dargestellt, wurde deshalb nicht näher untersucht, weil bereits der hier betrachtete Kernenergieausbau zu erheblichen Anforderungen an die Uranversorgung führt.

Wie auch bei den Entwicklungsmodellen für die Bundesrepublik Deutschland handelt es sich hier nicht um eine Prognose. Es soll vielmehr eine mögliche Entwicklung umrissen werden, bei der die Kernenergie circa 1/3 der Primärenergieversorgung bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts übernimmt.

#### Der Uranbedarf und wichtige Einflußgrößen

Ein Kernenergieeinsatz im betrachteten Umfang würde 2050 (5000 GW<sub>e</sub>) jährlich etwa 0,5 Mio t<sup>++)</sup> Natururan erfordern, sofern ausschließlich gegenwärtige Reaktortypen mit LWR-Verbrauchscharakteristik eingesetzt werden. Derartige Mengen sind nach dem heutigen Stand der Kenntnisse nicht über längere Zeit bei akzeptablem Aufwand beschaffbar.

Ein Anteil der Kernenergie von 20 % bis 40 % an der Primärenergieversorgung im nächsten Jahrhundert erfordert daher, in zunehmendem Maße hochkonvertierende Reaktoren oder Brutreaktoren einzusetzen. Die Uranversorgungssituation wird dann durch Senkung des jährlichen Bedarfs (z.B. 2050 auf 0,01 bis 0,1 Mio t U) entspannt. Hinzu kommt, daß um so höhere Gewinnungskosten für Uran tolerierbar sind, je geringer der spezifische Uranbedarf ist. Damit wird die Ressourcenbasis durch Übergang zu uransparenden Reaktortypen auf ärmere, tiefere und entlegene Lagerstätten erweitert.

---

<sup>+)</sup>  Auf der World Energy Conference 1977 wurden etwa 5000 GW<sub>e</sub> bereits für 2020 genannt.

<sup>++)</sup> Bei Spaltstoff-Rezyklierung

Aus physikalischen und technischen Gründen erfordern alle uransparen den Reaktortypen für ihren Start zunächst größere Mengen an Spaltstoff (Pu-239 oder U-233 oder U-235) für den ersten Kern und die ersten Nachladungen ("Zyklusinventare"), bevor sie dann mit rückgeführtem Spaltstoff uransparend weiterarbeiten können. Die Zyklusinventare an Spaltstoff werden ganz oder überwiegend von uranintensiven thermischen Reaktoren bereitgestellt<sup>+)</sup> . Plutonium wird überwiegend aus LWR, U-233 aus mäßig konvertierenden LWR oder HTR (z.B. "Vorbrüter") stammen. Die Konsequenz ist, daß der Weg zu uransparen den Reaktortypen eine Zeitspanne für den Aufbau von Zyklusinventaren erfordert, in der viel Uran gebraucht wird. Wieviel Uran während dieser Zeitperiode benötigt wird, hängt nicht nur von den spezifischen Zyklusinventaren an Spaltstoff ab, sondern auch vom Zeitpunkt, ab dem der Übergang zum Bau uransparen der Reaktortypen ökonomisch klar als vorteilhaft erkennbar ist, und von der Geschwindigkeit, mit der sich dieser Übergang vollzieht.

Die großtechnische Demonstration der sicheren und wirtschaftlichen Schließung des Brennstoffkreislaufs (insbesondere Wiederaufarbeitung und Brennelementfabrikation aus Rückfuhrbrennstoff) ist für Brüter oder gute Konverter nicht vor Mitte der 90er Jahre zu erwarten. Wenn dann in zunehmendem Umfang zur Bestellung uransparen der Reaktortypen übergegangen wird, führt das wegen der Projektlaufzeiten von rd. 10 Jahren erst nach 2000 zu entsprechend wachsenden Anteilen an der installierten Kapazität. Wenn die Voraussetzung seitens technischer und ökonomischer Demonstration in industriellem Maßstab für eine Reihe größerer Länder erfüllt sind, wird die Einführungsgeschwindigkeit uransparen der Reaktortypen unter anderem von der Uranpreisentwicklung und von den dann besser überschaubaren typenspezifischen Kosten abhängen. Dabei muß damit gerechnet werden, daß die Ein-

---

<sup>+)</sup>  Der mögliche Start von SBR mit zu ca. 20 % angereichertem U-235 und schrittweisem Übergang zu Pu als Spaltstoff kann den Natururan aufwand nicht entscheidend gegenüber dem Weg über LWR-Plutonium mindern.

führung uransparender Reaktortypen langsamer erfolgt, als es aufgrund rein technischer Bedingungen (genügend Spaltstoff zum Aufbau der Zyklusinventare) möglich wäre.

Hinsichtlich des Uranbedarfs für die wichtige Übergangsphase von uranintensiven zu uransparenden Reaktortypen spielen also drei Einflußgrößen eine wichtige Rolle: Der Zeitpunkt der breiten kommerziellen Einführung uransparender Reaktortypen, die Geschwindigkeit des Übergangs von uranintensiven zu uransparenden Reaktortypen und die typenspezifischen Anforderungen an einen Mindesteinsatz uranintensiver Reaktoren zur Lieferung der Zyklusinventare an Spaltstoff für uransparende Reaktortypen.

Die Frage ist nun, welche der drei genannten Einflußgrößen den Uranbedarf während der Aufbauphase für uransparende Reaktortypen am stärksten bestimmt und welche Anforderungen demzufolge bestehen. Eine Teilantwort vermittelt Abb. I-5 für den bis 2100 zeitlich summierten Uranbedarf der thermischen Reaktoren gegenwärtiger Bauart (meist LWR) für den Fall des Übergangs zu SBR. Dabei ist der zeitlich summierte LWR-Uranbedarf der Welt unter den beschriebenen Annahmen für den Umfang des Kernenergieeinsatzes als Funktion des Einführungszeitpunktes bei jeweils drei Varianten für die Einführungsgeschwindigkeit (Linien a, b und c) und drei Varianten für Zyklusinventare an Plutonium je  $\text{GW}_e$  (gestrichelte Linien) dargestellt. Bei der durch c gekennzeichneten Linie für die Einführungsgeschwindigkeit würde die Einführung von SBR nach dem jeweiligen Einführungszeitpunkt  $t_e$  etwa so rasch erfolgen wie die Einführung der thermischen Reaktoren in den 70er Jahren. Die durch a gekennzeichnete Linie stellt den unrealistischen Grenzfall dar, in dem nach  $t_e$  nur noch SBR hinzugebaut werden. Nach Aussortierung unrealistischer Bereiche in Abb. I-5 erscheint es als äußerst schwierig, den Natururanbedarf für die Aufbauphase der SBR unter etwa 15 Mio t zu senken.

Abschätzungen für den Fall, daß als uransparende Reaktortypen nicht SBR, sondern mit U-233 als Spaltstoff arbeitende Leichtwasserbrutreaktoren (LWBR) oder hochkonvertierende HTR eingesetzt werden, lassen für den

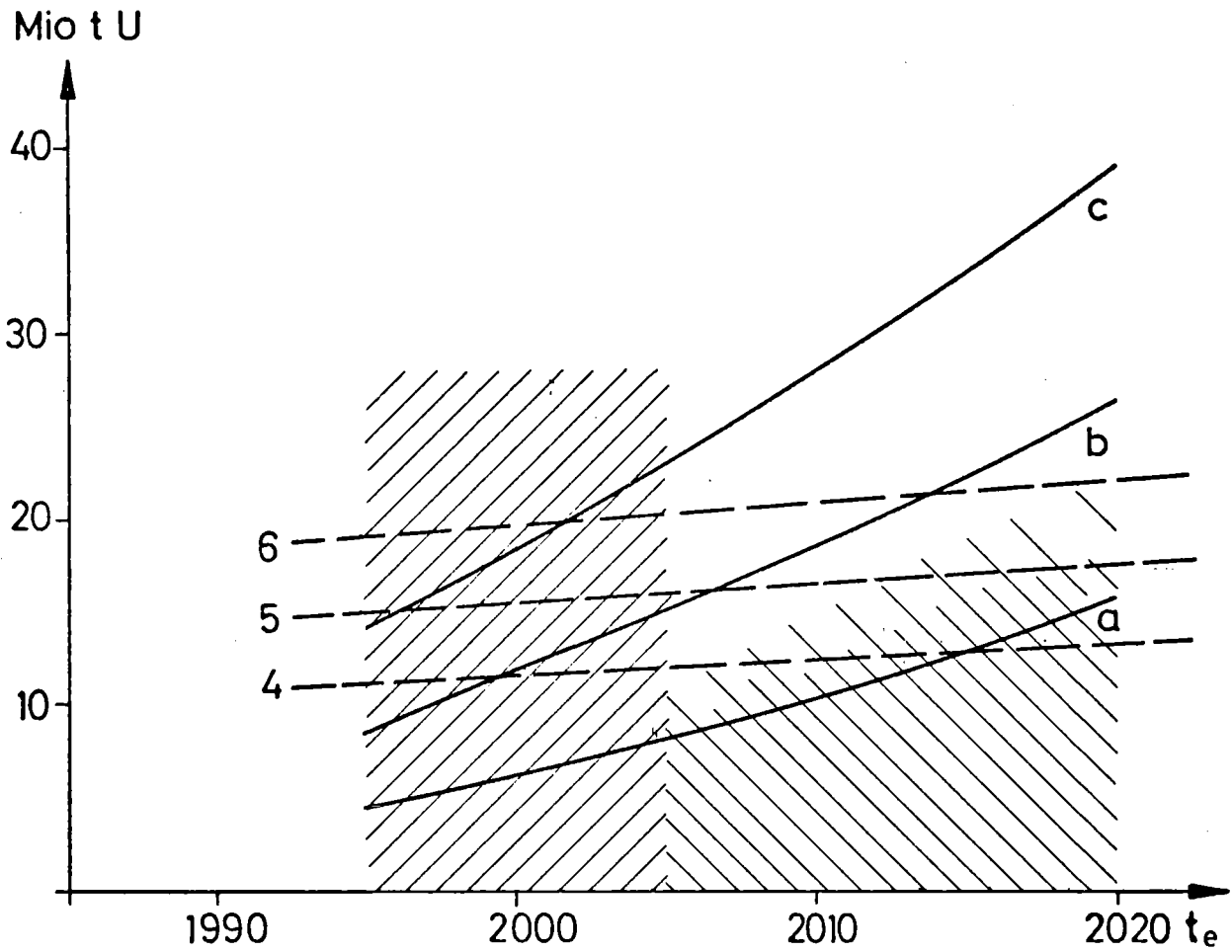


Abb. I-5: Kumulierter Welt-Uranbedarf  
(1970-2100) für LWR in Abhängigkeit vom Einführungs-  
zeitpunkt  $t_e$  uransparender Reaktoren

unrealistische Bereiche schraffiert

4,5,6: Zyklusinventare ( $t \text{ Pu}^+/\text{GWe}$ ) für SBR  
(gestrichelte Linien)

a,b,c: Parameter für verschiedene Einführungsgeschwindigkeiten

+) spaltbarer Pu-Anteil

Natururanbedarf während der Aufbauphase<sup>+</sup>) keine deutlichen Unterschiede gegenüber dem SBR-Fall ( $\approx 15$  Mio t U) erkennen.

Soweit sich Alternativen bezüglich des Anteils der Kernenergie an der Primärenergieversorgung bei etwa gleicher Form der Zeitkurve für die Kernenergiekapazität wie in Abb. I-4 nur durch einen zeitunabhängigen Faktor unterscheiden, lassen sich die Aussagen zum Uranbedarf proportional umrechnen. Der Verlauf bis etwa 1990 ist dabei von untergeordneter Bedeutung.

Ein kumulierter Natururanbedarf von etwa 15 Mio t stößt nicht auf grundsätzliche Bedenken bezüglich der Vorratsbasis (vgl. Abschnitt 5). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß der überwiegende Teil davon innerhalb der nächsten 50 Jahre anfallen würde. Abb. I-6 verdeutlicht dies durch ausgewählte Zeitkurven für den jährlichen Natururanbedarf<sup>++</sup>). Die Abbildung verdeutlicht außerdem, daß der Weg zu uransparenen Reaktoren bei realistischen Einschätzungen von Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit über etwa eine Verzehnfachung des gegenwärtigen jährlichen Natururanbedarfs führt. Erst danach kann mit einem Bedarfsrückgang gerechnet werden, der sich - je nach Typ und Einführungsgeschwindigkeit der "Uransparer" - mehr oder weniger rasch vollzieht.

---

<sup>+</sup>) In diesen Fällen gehört außer der Einsatzperiode thermischer Reaktoren gegenwärtiger Bauart eine Periode verstärkten Einsatzes vorbrütender Reaktortypen zur Aufbauphase.

<sup>++</sup>) Die dabei zugrundegelegte Einführungsgeschwindigkeit für uransparende Reaktoren (in diesem Fall SBR) entspricht der Linie b in Abb. I-5. Der Zubau von SBR nach  $t_e$  würde dabei etwa doppelt so rasch erfolgen wie der Zubau von LWR in den 70er Jahren.

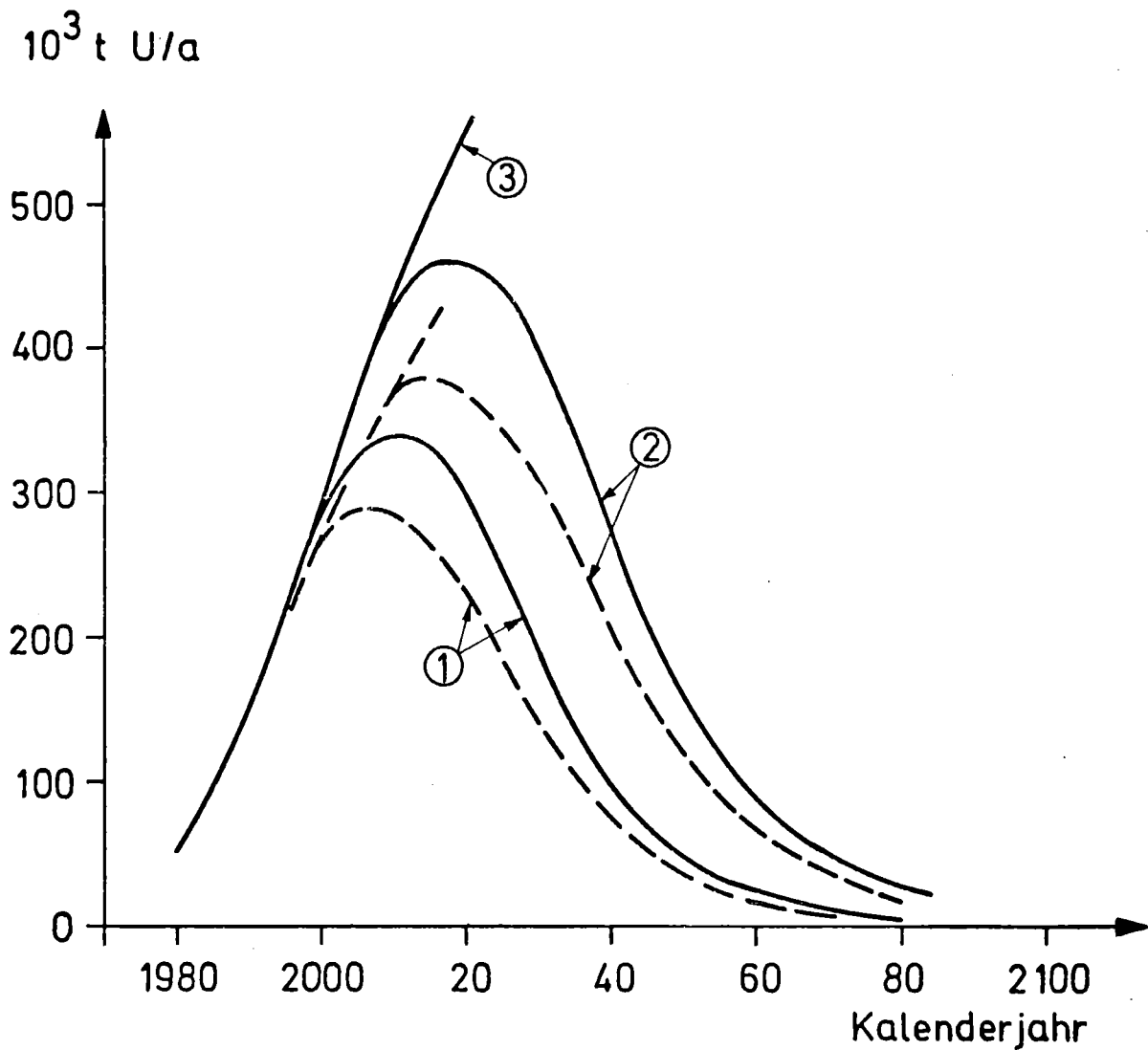


Abb. I-6: Jährlicher Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren bei verschiedenen Einführungszeitpunkten für uransparende Reaktoren

Zeitkonstante für Einführungsgeschwindigkeit = 15 Jahre

— ohne Rezyklierung von Resturan und Pu

--- bei Rezyklierung von Resturan ab 1990

Kurvenbezeichnung:

(1) = Einführungszeitpunkt für uransparende Reaktoren  $t_e = 2000$

(2) = Einführungszeitpunkt für uransparende Reaktoren  $t_e = 2010$

(3) = kein Einsatz uransparender Reaktoren

## 5. Die Uranvorräte der Welt und ihre Verfügbarkeit

Angaben über die Uranvorräte der Welt weisen teilweise recht unterschiedliche Zahlen aus. Sie sind sorgfältig zu unterscheiden nach den Kosten, zu denen die Vorräte gefördert werden können, und nach der Informationsbasis, auf die sich die Angaben stützen und die die Genauigkeit der Angaben bestimmt.

Als "einigermaßen gesicherte" Vorräte gelten solche, die in bekannten Lagerstätten durch Explorationsbohrungen näher vermessen sind und mit gegenwärtigen Technologien gewonnen werden können. Ein geringerer Gewißheitsgrad besteht für "geschätzte zusätzliche" Vorräte, die für nicht explorierte Verzweigungen bekannter Lagerstätten oder noch nicht identifizierte Lagerstätten bekannter Lagerstättenprovinzen als vorhanden und mit gegenwärtigen Technologien gewinnbar vermutet werden. Bei "prognostischen" Vorräten handelt es sich um Schätzungen auf der Basis allgemeinerer geologischer Hinweise, wobei auch der unterschiedliche Explorationsgrad in unterschiedlichen Gebieten der Erde berücksichtigt wird. Die prognostischen Vorräte sind nicht als Schätzungen für eine mögliche obere Grenze wirtschaftlich gewinnbarer Vorräte zu verstehen.

Tabelle I-1 enthält jüngere Angaben /BGR (1976), OECD (1977)/ über die Weltvorräte für unterschiedliche Gewißheitsgrade.

Tabelle I-1: Uranvorräte der Welt<sup>+) in 10<sup>6</sup>t  
Gewinnungskosten  $\leq$  130 \$/kg U<sup>++)</sup></sup>

Einigermaßen gesicherte Vorräte	2,4 - 2,5
Geschätzte zusätzliche Vorräte	3,2 - 3,7
Prognostische Vorräte	<u>5,4 - 6,3</u>
Summe	11 - 12,5

---

<sup>+) Incl. Ostblockländer und China</sup>

<sup>++) 78 \$/kg U  $\cong$  30 \$/1b U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, 130 \$/kg U  $\cong$  50 \$/1b U<sub>3</sub>O<sub>8</sub></sup>

Gegenwärtig gelten Gewinnungskosten unter etwa 80  $\text{§/kg U}$  als wirtschaftlich attraktiv. Die für Tab. I-1 maßgebenden Grenzkosten von 130  $\text{§/kg U}$  könnten innerhalb der nächsten 10 Jahre wirtschaftlich attraktiv werden. Vor einem größeren Zeithintergrund sind auch Lagerstätten in Betracht zu ziehen, aus denen das Uran mit Kosten in der Gegend von 300 oder 400  $\text{§/kg U}^{+)$  gewonnen werden kann. Die Gewinnungskosten würden sich dann mit 3-4  $\text{Dpf/kWh}^{+)$  in den Stromerzeugungskosten beim LWR niederschlagen und den Brennstoffkosten in gegenwärtigen Steinkohlekraftwerken in der Bundesrepublik entsprechen. Deshalb sind in Tab. I-2 ( für die westliche Welt) identifizierte Ressourcen zusammengestellt, die sich auch auf deutlich ärmere Erze erstrecken, als sie gegenwärtig wirtschaftlich interessant sind. Über sogenannte prognostische Ressourcen für die Konzentrationsbereiche 2 und 3 liegen keine belastbaren Schätzungen vor. Es ist jedoch bisher kaum gezielt nach Vorräten in diesen Konzentrationsbereichen gesucht worden.

Die Vorräte im Konzentrationsbereich 3 kommen aus wirtschaftlichen Gründen kaum für Nutzung in Reaktoren gegenwärtiger Bauart in Betracht, sondern eher für Nutzung in uransparenden Reaktoren.

Prospektion, Exploration und Verbrauch werden die Zahlen in den einzelnen Ressourcenkategorien der Tab. I-2 von Jahr zu Jahr etwas verändern. Es ist darauf hinzuweisen, daß die prognostischen Ressourcen keineswegs als obere Grenze zu verstehen sind. Es ist möglich, daß der größte Teil der abbaubaren Lagerstätten bisher unentdeckt blieb und daß noch mehrere 10 Mio t U gefunden werden können. Vorliegende spekulative Hochrechnungen können jedoch nicht als belastbare Aussagen dafür angesehen werden.

Wenn es lediglich um eine statische Betrachtungsweise, d.h. um die Frage ginge, wieviel Uran irgendwann einmal zu akzeptablen Kosten gefördert werden kann, könnte die Vorratssituation selbst für einen kumulierten Bedarf von 20 bis 30 Mio t U optimistisch beurteilt werden. Bei näherer

---

+ ) In gegenwärtigen Preisen



Tabelle I-2: Uran-Ressourcenbasis der westlichen Welt in Mio t

		<u>Konzentrationsbereich 1</u>	<u>Konzentrationsbereich 2</u>	<u>Konzentrationsbereich 3</u>
		Urangehalt $\gtrsim$ 500 ppm U <sup>1)</sup> (Kosten <sup>2)</sup> $\lesssim$ 130 \$/kg U)	Urangehalt 100 bis 500 ppm U (Kosten <sup>2)</sup> etwa zwischen 130 und 600 \$/kg U)	Urangehalt $\lesssim$ 100 ppm U <sup>5)</sup> (Kosten <sup>2)</sup> $\gtrsim$ 400 \$/kg U)
Identifizierte Ressourcen	einigermaßen gesicherte Vorräte	2,2		
	geschätzte zusätzliche Vorräte	4,3 <sup>7)</sup> 2,1	8 <sup>4)</sup>	40 - 60 <sup>6)</sup>
Prognostische zusätzl. Ressourcen, noch nicht gefunden, geschätzt nach geologischen Anhaltspunkten		5 <sup>3)</sup>	?	?

Erläuterungen:

- 1) Gegenwärtig wird Uranerz mit einer durchschnittlichen Konzentration von 1300 ppm U gefördert
- 2) Gewinnungskosten - Schätzungen 1977, Geldwert 1977
- 3) Quelle: /BGR (1976)/
- 4) Davon 5,8 Mio t U in Phosphat-Lagerstätten mit typisch 150 ppm Urankonzentration, wobei das Uran vorerst nur als Nebenprodukt attraktiv ist. Zweitgrößter Beitrag: 1,2 Mio t U in schwedischen Schwarzschiefern mit 200-400 ppm U /NUCL. NEWS (1977)/
- 5) Überwiegend bei Urankonzentrationen von 20-70 ppm
- 6) Quellen: /BGR (1976)/, /DEGENS, E.T., et al. (1977)/, /HABASHI, F. (1970)/
- 7) Quelle: /OECD (1977)/

Betrachtung der Versorgungssituation stellt sich jedoch heraus, daß die rechtzeitige Bereitstellung der erforderlichen Uranmengen das Hauptproblem darstellt. Dabei geht es um rechtzeitige Zufunde und um rechtzeitige Erhöhung der Förderkapazitäten.

#### Erforderliche Förderkapazität und Zufundrate

Der erforderliche Ausbau der weltweiten Förderkapazität für Natururan um rund einen Faktor 10 erfordert nicht nur Kapital und Investitionsbereitschaft bei ungewisser Marktentwicklung. Es geht auch um Technologieentwicklung zur Urangewinnung aus unkonventionellen Lagerstätten, um nationale und regionale Genehmigungsprobleme und rechtzeitige Entwicklung einer regionalen Infrastruktur in entlegenen Gebieten.

Der erwartbare Übergang zur Gewinnung von Uran aus ärmeren Erzen hat außerdem zur Folge, daß die Mengen uranhaltigen Gesteins, die jährlich gefördert, gemahlen und chemisch aufbereitet werden müssen, noch rascher steigen als die jährliche Uranproduktion. Die spezifischen Anforderungen an Umweltschutzmaßnahmen und Rekultivierung der Landschaft dürften weiter zunehmen.

Weder die Mengenprobleme noch die anderen genannten Bereiche möglicher Engpässe lassen die erforderliche Ausweitung der Förderkapazität als unmöglich erscheinen. Es wäre jedoch ein außergewöhnlich gut und rechtzeitig abgestimmtes Bündel weltweiter Aktivitäten in den genannten Bereichen erforderlich, um das durch die jeweilige Reservesituation gegebene Potential für die Produktionskapazität voll ausschöpfen zu können.

Realistisch muß man davon ausgehen, daß immer ein Teil der weitgehend gesicherten und als wirtschaftlich gewinnbar identifizierten Uranvorkommen

(Reserven) nicht oder stark verzögert zur jeweils technisch möglichen Produktion von Urankonzentrat gelangt.

Um die Bauzeit für die Minen und Mindestvorräte für 5-10 Betriebsjahre abzudecken, müssen die entsprechenden Reserven etwa 10 Jahre vor ihrer aktuellen Förderung gesichert sein. Für die in Abschnitt 4 beschriebene Ausweitung des Uranbedarfs ergibt sich daraus, daß im Durchschnitt der nächsten 30 Jahre jährlich 0,2 bis 0,25 Mio t Uran durch entsprechende Prospektions- und Explorationsaufwendungen in Reserven überführt werden müssen. Das bedeutet eine erforderliche Verdopplung oder Verdreifachung gegenüber gegenwärtigen Zufundraten bei steigenden spezifischen Kosten für Prospektion und Exploration. Ein besonderes Problem ist dabei, daß entsprechende Programme und Investitionen wegen der großen Vorlaufzeiten unter großen Unsicherheiten über die Nachfrageentwicklung eingeleitet werden müssen.

#### Geographische Verteilungsstruktur bei Uranbedarf und Uranversorgung und Implikationen für die Bundesrepublik Deutschland

Zumindest bis Mitte der 80er Jahre wird die Bundesrepublik Natururan vorwiegend aus Südafrika und Kanada, kleinere Mengen aus Frankreich, Niger, Gabun und den USA beziehen. Vertraglich abgesichert sind ca. 26 000 t U /JAECK, W. u.a. (1977)/, die den Bedarf bis 1981 ganz und bis Mitte der 80er Jahre teilweise abdecken.

Perspektiven für weitere Importe ergeben sich aus einer Gegenüberstellung der Verteilungsstruktur von Uranbedarf und möglicher Urangewinnungskapazität für Länder bzw. Ländergruppen der westlichen Welt.

Tabelle I-3 enthält dazu Angaben.

Tabelle I-3: Verteilung von Uranbedarf und Uranversorgung auf die westliche Welt für 1985<sup>+</sup>)

	Anteil an der installierten Kernenergie- Kapazität	Mögl. Anteil an der Uran-Pro- duktionskapazi- tät	Anteil an den Uran- Vorräten <sup>++)</sup>
	in %	in %	in %
USA	41	39	43
Kanada	4	14	18
Afrika	-	26	21
Australien	-	13	11
Westeuropa	38	6	3
Japan	10	0	0
Rest westl. Welt	7	2	4
	100	100	100

Die Tabelle läßt erkennen, daß auf absehbare Zeit nur Kanada, Australien und einige Länder Afrikas (überwiegend Südafrika) größere Mengen an Uran netto exportieren können. Diesen Ländern stehen insbesondere Japan und Westeuropa als Importländer mit geringer eigener Produktionskapazität für Uran und geringen Vorräte gegenüber.

Insbesondere innenpolitische Gründe könnten dazu führen, daß die Produktionskapazitäten in den genannten Exportländern nicht in dem gegenwärtig für möglich gehaltenen Ausmaß erweitert werden oder daß ein Teil der produzierbaren Uranmengen nicht auf den Weltmarkt gelangt.

Gegenwärtig wird das Ausbautempo der Kernenergie in vielen Ländern verringert. Wenn es sich dabei um eine Zwischenperiode handelt, nach der der weltweite Einsatz etwa auf den in Abschnitt 4 diskutierten Umfang steigt, sind aus Kostengründen und wegen nachfrageseitiger Konkurrenz erhebliche Preissteigerungen für Uran nicht auszuschließen.

<sup>+</sup>) Quelle: /OECD (1977)/

<sup>++)</sup> Gesicherte Reserven plus geschätzte zusätzliche Vorräte, Kosten  $\leq$  80 \$ Kg U, Kenntnisstand 1977

## II. Fragen der Brennstoffentsorgung bei einem großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

### 1. Vorbemerkung

Hauptziel dieses Teils der Studie ist es, einen Beitrag zur Ermittlung der Mengenströme bei den einzelnen Schritten der Entsorgung bestrahlten Kernbrennstoffs zu leisten. Ausgegangen wird von den in Teil I beschriebenen drei Szenarien über die mögliche Entwicklung der langfristig in der Bundesrepublik Deutschland zu erwartenden installierten Kernenergieleistung. Bei jedem dieser Szenarien wird zwischen einem frühen Zeitpunkt (Anfang der 90er Jahre) und einem späten Zeitpunkt (10 Jahre später) des beginnenden kommerziellen Einsatzes uran-spenderer Reaktoren - wie Schneller Brutreaktor (SBR) und Hochtemperaturreaktor (HTR) - unterschieden, so daß sich insgesamt sechs Szenarien als Ausgangsbasis ergeben.

Im einzelnen werden für diese sechs Szenarien

- der Anfall von abgebrannten Kernbrennstoffen aus Leichtwasserreaktoren, Schnellen Brutreaktoren und Hochtemperaturreaktoren,
- der Plutoniumanfall aus Leichtwasserreaktoren,
- die Kernbrennstoffersparnis (Spaltstoffersparnis) bei Rezyklieren des spaltbaren Plutoniums und zurückgewonnenen Urans in Leichtwasserreaktoren,
- der Lagerbeckenbedarf für abgebrannte Leichtwasserreaktor-Brennelemente in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Arbeitseinsatzes der Anlagen zur Wiederaufarbeitung von bestrahltem Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren,
- die zu installierende Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität,
- der Anfall von verfestigten radioaktiven Abfällen,
- die Anzahl der Transporte abgebrannter Brennelemente zur Wiederaufarbeitungsanlage sowie

- die Anzahl der benötigten Transportbehälter bei vorgegebener Behälterkapazität

ermittelt.

Es wird angenommen, daß die durch die fortgeschrittenen Reaktoren insgesamt abzudeckende installierte Nuklearleistung zu gleichen Teilen auf Schnelle Brutreaktoren und Hochtemperaturreaktoren entfällt.

Im folgenden werden die Ergebnisse der Analysen für einen mittleren Entwicklungspfad (Szenario B - 1985: 25 GW<sub>e</sub>, 2000: 84 GW<sub>e</sub>, 2020: 138 GW<sub>e</sub>, 2050: 175 GW<sub>e</sub>) bei angenommenem spätem Einsatz von fortgeschrittenen Reaktoren beispielhaft dargestellt<sup>+)</sup> . Abb. II-1 zeigt für dieses Szenario die installierte Nuklearleistung und deren Aufteilung in einen Leichtwasserreaktor-, einen Schnellbrüter- und einen Hochtemperaturreaktor-Anteil.

---

<sup>+)</sup>  In der ausführlichen Fassung von Teil II (KfK 2702) wird - abweichend von dieser Kurzfassung - zur Erläuterung der in dieser Teilstudie durchgeführten Analysen mit Schwerpunkt das Szenario B bei angenommenem frühen Einsatz von fortgeschrittenen Reaktoren herangezogen.

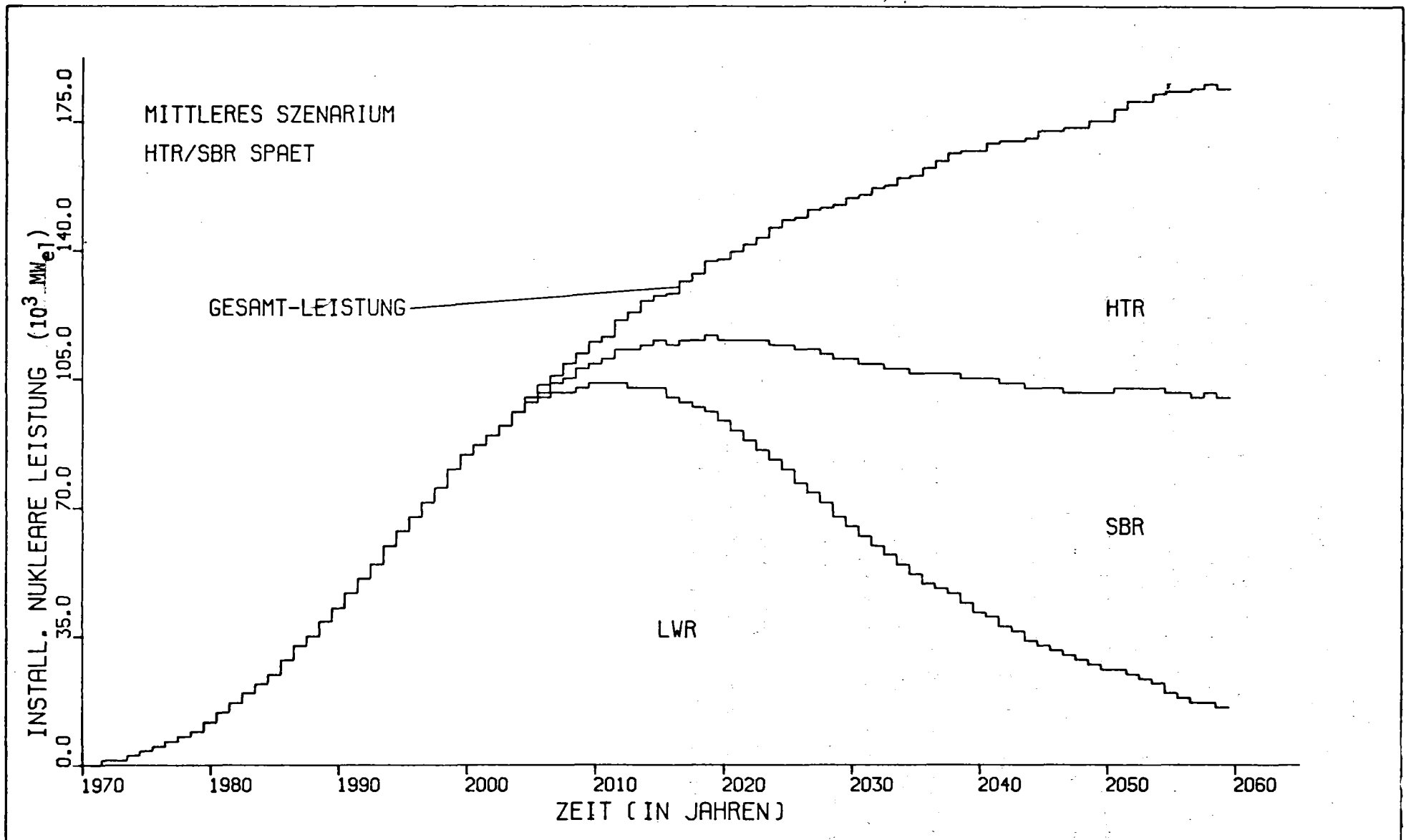


Abb. II-1: Mittlerer Entwicklungspfad der zu erwartenden installierten Kernenergieleistung in der Bundesrepublik Deutschland und Aufteilung in einen Leichtwasserreaktor-, einen Schnellen Brutreaktor- und einen Hochtemperaturreaktor-Anteil bei spätem Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren

## 2. Jährlicher und kumulierter Anfall von abgebrannten Kernbrennstoffen

Die durchgeführten Rechnungen beziehen sich schwerpunktmäßig auf den Betrieb von Leichtwasserreaktoren, da sich nur dieser Reaktortyp in kommerziellem Einsatz befindet und daher entsprechende Betriebsdaten vorliegen. Hinsichtlich der Angaben für den Schnellen Brutreaktor und den Hochtemperaturreaktor wurde, soweit wie möglich, auf heute bekannte Konzeptionen zurückgegriffen; ansonsten sind die Datenangaben aus den Leichtwasserreaktoren hergeleitete Schätzwerte, so z.B. die Angaben für den Anfall von radioaktiven Abfällen.

Die Brennelemente eines Reaktors setzen sich zusammen aus dem Strukturmaterial und der Schwermetallverbindung. Die Mengenangaben bei den Abbildungen und Tabellen zum Brennstoffanfall sind jedoch der Einheitlichkeit wegen immer Angaben in Tonnen Schwermetall.

Beim Aufbau des Rechenprogramms und bei der Durchführung der Rechnungen wurde für den zeitlichen Ablauf der Brennstoffzyklusdienste das in Abb. II-2 dargestellte Zeitschema angewandt. Das Rechenprogramm läßt nur Ganzjahresschritte zu.



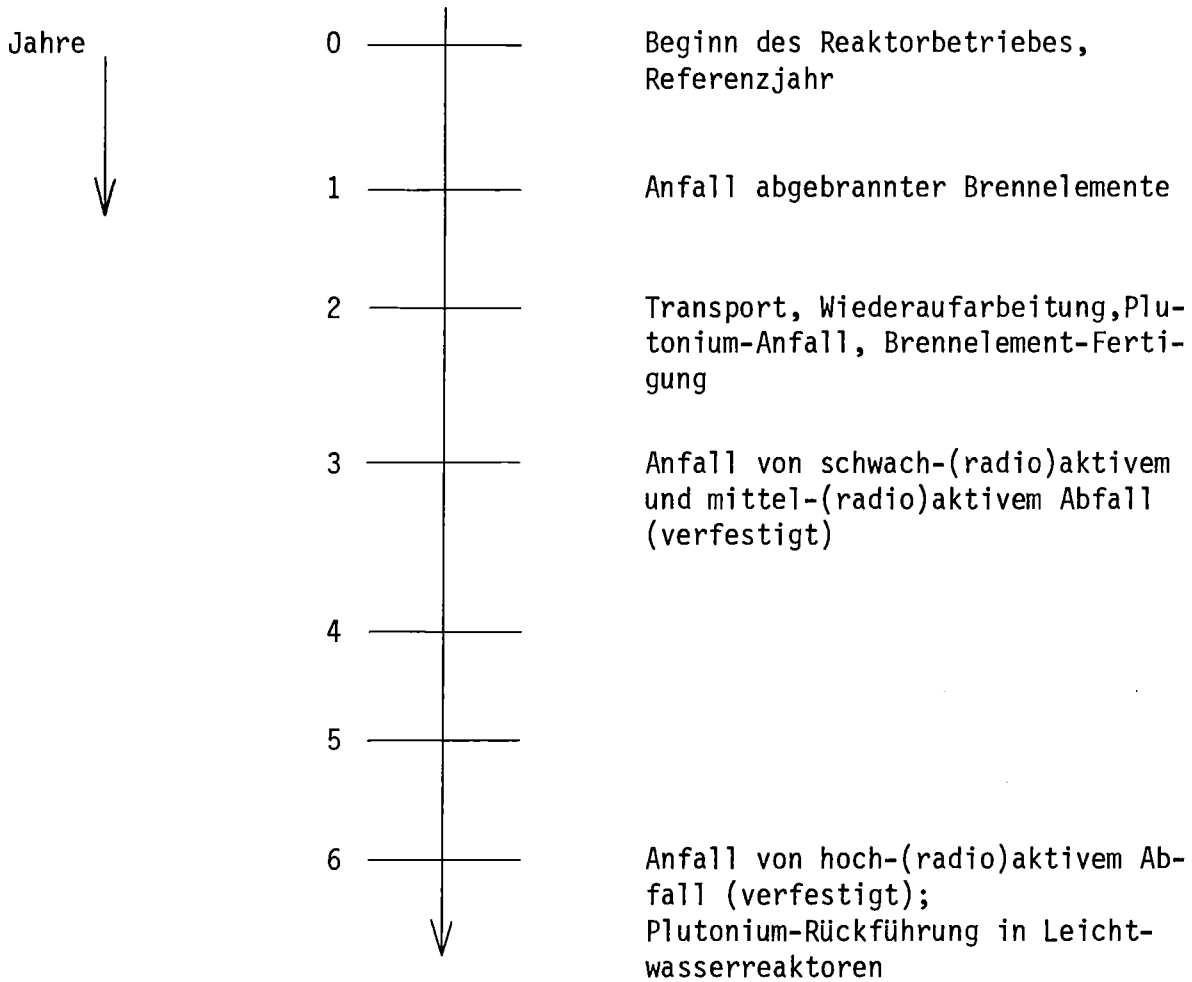


Abb. II-2 : Programminterne Zeitskala für den zeitlichen Ablauf der Brennstoffzyklusdienste

Anfall von abgebranntem Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren

Der Brennstoffanfall aus Leichtwasserreaktoren für Szenario B bei spätem Einsatz von Schnellem Brutreaktor und Hochtemperaturreaktor kann aus Abb. II-3 und Tab. II-1 entnommen werden. Die Ausgangsgrößen für die

Berechnungen liefern die Zuwächse an installierter Nuklearleistung gemäß Abb. II-1. Dabei wird eine Brennstoffentladung von 23,65 t SM/ $\text{GW}_e \cdot \text{a}$  zugrundegelegt.

Gemäß dem gewählten Szenario beläuft sich der Anfall von bestrahltem Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren im Jahre 1985 auf ca. 523 t SM, erreicht sein Maximum in den Jahren 2011 bis 2013 mit ca. 2460 t SM und geht im Jahre 2030 auf ca. 1600 t SM und bis zum Jahre 2050 auf ca. 650 t SM zurück.

Der kumulierte Anfall von bestrahltem Kernbrennstoff, allein aus den Leichtwasserreaktoren, beträgt

bis zum Jahre 1985	ca. 2 900 t SM
bis zum Jahre 2000	ca. 21 000 t SM
bis zum Jahre 2020	ca. 68 000 t SM
und bis zum Jahre 2050	ca. 108 000 t SM.

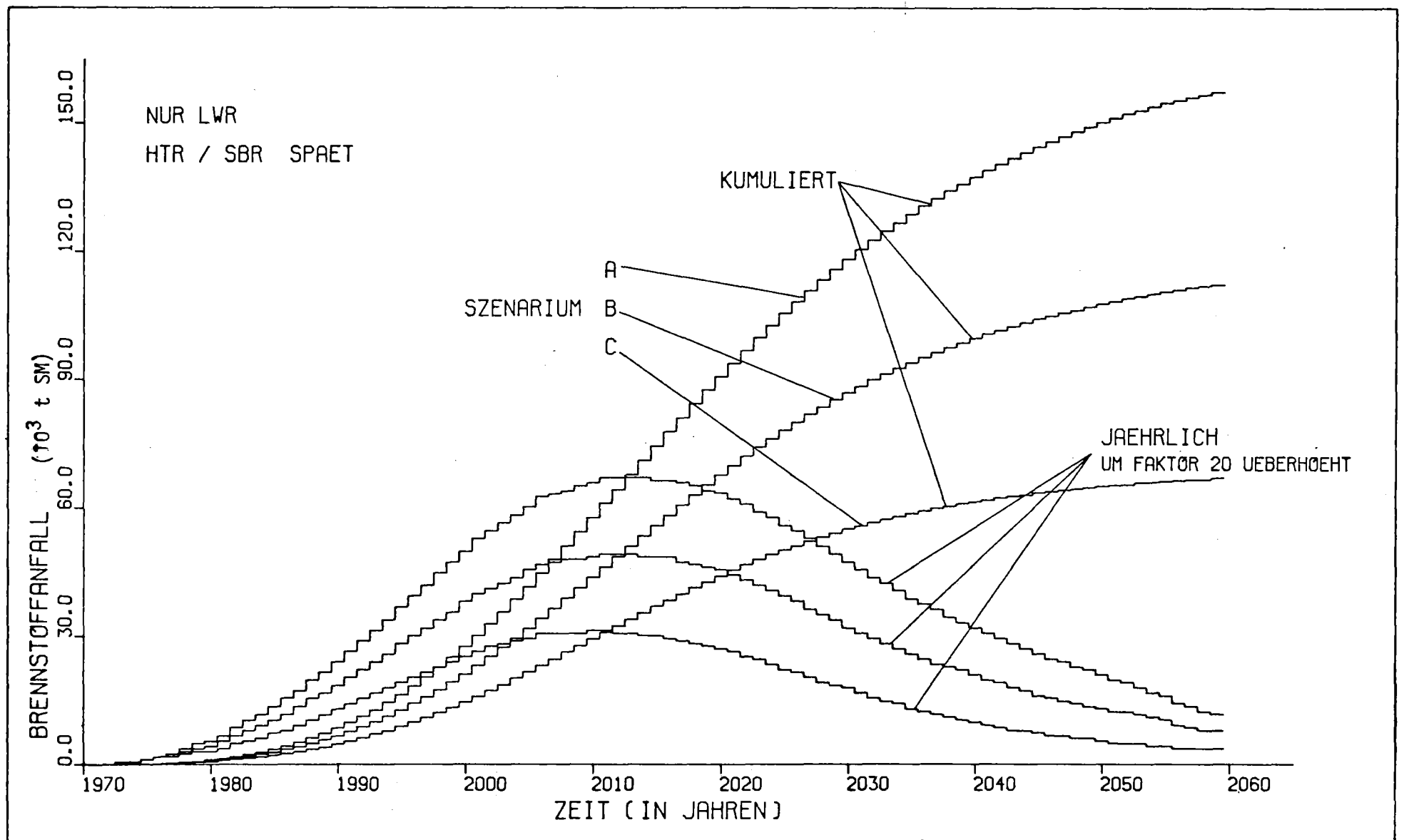


Abb. II-3: Jährlicher und kumulierter Anfall von bestrahltem Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren als Funktion der Zeit (in Kalenderjahren) für die Szenarien A, B und C bei spätem Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren

Tabelle II-1:

Jährlicher und kumulierter Brennstoffanfall aus Leichtwasserreaktoren in Tonnen als Funktion der Zeit (in Jahren) bei spätem Einsatz von fortgeschrittenen Reaktoren (Mittleres Szenario)

Jahr	Brennstoffanfall (t SM)	
	Jährlich	Kumuliert
1975	61	123
1976	92	215
1977	123	338
1978	154	492
1979	184	676
1980	215	891
1981	277	1168
1982	338	1507
1983	400	1906
1984	461	2368
1985	523	2890
1986	584	3475
1987	676	4151
1990	923	6673
1991	1015	7688
1992	1107	8794
1993	1199	9994
1994	1292	11285
1995	1414	12700
1996	1507	14207
1997	1599	15806
1998	1691	17497
1999	1784	19280
2000	1906	21187
2005	2276	31826
2010	2429	43757
2015	2429	55996
2020	2276	67712
2030	1599	86930
2040	1046	99692
2050	646	107717
2060	369	112668

### Anfall von abgebranntem Kernbrennstoff aus Schnellen Brutreaktoren und Hochtemperaturreaktoren

Für die Berechnung des Anfalls von bestrahltem Brennstoff aus Schnellen Brutreaktoren wurde eine Entlademenge von 13,83 t SM/GW<sub>e</sub>·a angenommen. Tab. II-2 zeigt die Ergebnisse für den jährlichen und kumulierten Brennstoffanfall.

Die Berechnung für den Anfall von bestrahltem Kernbrennstoff aus Hochtemperaturreaktoren wurde für zwei Abbrandvarianten durchgeführt: 90 000 MWd/t und 30 000 MWd/t. Für die Variante "hoher Abbrand" und das Szenario B bei spätem Einsatz von Schnellen Brutreaktoren und Hochtemperaturreaktoren zeigt Tab. II-3 den jährlichen und kumulierten Brennstoffanfall. Dabei wird von einem Brennstoffdurchsatz von 7,10 t SM/GW<sub>e</sub>·a ausgegangen.

Tabelle II-2:

Jährlicher und kumulierter Brennstoffanfall aus Schnellen Brutreaktoren (Core + Blanket) in Tonnen als Funktion der Zeit (in Jahren) bei spätem Einsatz von fortgeschrittenen Reaktoren (Mittleres Szenario)

Jahr	Brennstoffanfall (t SM)	
	Jährlich	Kumuliert
1995	-	-
2000	-	-
2005	-	-
2010	55	166
2015	166	746
2020	276	1852
2025	442	3677
2030	581	6304
2035	719	9622
2040	857	13631
2045	940	18138
2050	1023	23088
2055	1106	28424
2060	1161	34175

Tabelle II-3:

Jährlicher und kumulierter Brennstoffanfall aus Hochtemperaturreaktoren (hoher Abbrand, 90 000 MWd/t) in Tonnen als Funktion der Zeit (in Jahren) bei spätem Einsatz von fortgeschrittenen Reaktoren (Mittleres Szenario)

Jahr	Brennstoffanfall (t SM)	
	Jährlich	Kumuliert
1995	-	-
2000	-	-
2005	-	-
2010	37	102
2015	83	406
2020	148	997
2025	222	1957
2030	305	3323
2035	378	5067
2040	434	7135
2045	489	9488
2050	526	12045
2055	572	14814
2060	600	17777

### 3. Plutoniumanfall aus Leichtwasserreaktoren

Das in thermischen Reaktoren gebildete Plutonium setzt sich im wesentlichen aus den spaltbaren Isotopen Pu-239 und Pu-241 und den durch thermische Neutronen nicht spaltbaren Isotopen Pu-238, Pu-240 und Pu-242 zusammen. Die prozentuale Zusammensetzung der Isotopen hängt von dem Maße des Abbrandes ab. Von großem Interesse sind Aussagen über den Mengenanfall von spaltbarem Plutonium ( $Pu_{fiss}$ ) bei der Aufarbeitung von bestrahltem Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoff, weil

dieses Plutonium wiederum als Kernbrennstoff in Leichtwasserreaktoren oder - ökonomisch sinnvoller - in Schnellen Brutreaktoren eingesetzt werden kann. Der jährliche Anfall von  $\text{Pu}_{\text{fiss}}$  erreicht sein Maximum in den Jahren 2012 bis 2014 mit 15,6 t.

Für Überlegungen hinsichtlich des Einsatzes von Plutonium als Erstcore-Ausstattung für Schnelle Brutreaktoren sind Informationen über den kumulierten Anfall der spaltbaren Plutoniumisotope besonders wichtig. Der kumulierte Anfall des spaltbaren Plutoniums für das betrachtete Szenario ist aus Tab. II-4 zu entnehmen. Das angefallene spaltbare Plutonium beläuft sich bis zum Jahre 2020 auf ca. 382 t und bis zum Jahre 2050 auf ca. 593 t; dies entspricht bei einem spezifischen Zyklusinventar von 6 Tonnen pro  $\text{GW}_e$  der Versorgung von 63  $\text{GW}_e$  bzw. 92  $\text{GW}_e$  an Schnellbrüter-Kapazität.

Tabelle II-4:

Jährlicher und kumulierter Anfall von spaltbarem Plutonium im Brennstoff aus Leichtwasserreaktoren in Tonnen als Funktion der Zeit (in Jahren) bei spätem Einsatz von fortgeschrittenen Reaktoren (Mittleres Szenario)

Jahr	Anfall an spaltbarem Plutonium (t)	
	Jährlich	Kumuliert
1975	0,2	0,4
1976	0,4	0,8
1977	0,6	1,4
1978	0,8	2,1
1979	1,0	3,1
1980	1,2	4,2
1981	1,4	5,6
1982	1,8	7,3
1983	2,1	9,3
1984	2,5	11,8
1985	2,9	14,6
1986	3,3	17,8
1987	3,7	21,4
1990	5,3	35,3
1991	5,8	40,9
1992	6,4	47,0
1993	7,0	53,7
1994	7,6	60,9
1995	8,2	68,7
1996	9,0	77,2
1997	9,5	86,2
1998	10,1	95,8
1999	10,7	105,9
2000	11,3	116,5
2005	13,8	177,2
2010	15,2	245,8
2015	15,4	315,8
2020	14,6	382,3
2030	10,7	489,1
2040	7,0	554,9
2050	4,3	592,7
2060	2,5	613,6



#### 4. Plutoniumrezyklierung in Leichtwasserreaktoren

Bei der Rezyklierung wird davon ausgegangen, daß das in der Reaktorbetriebsphase entstehende Plutonium und Resturan zum nächstmöglichen Betriebszyklus nach Abzug der Verluste bei Wiederaufarbeitung und Brennelementfertigung (ca. 3 %) rezykliert wird. Für die Phase "Abkühlen, Wiederaufarbeiten und Brennelementfertigung" wurde eine Zeitspanne von 2 Jahren (Excore-Zeit) angenommen.

Es wurden fünf aufeinanderfolgende unterschiedliche Plutonium-Rezyklierungen gerechnet; jede der fünf Plutonium-Rezyklierungen umfaßt fünf Belade- bzw. Entladezyklen, für welche die Brennelemente nach Anzahl und Art, d.h. nach Menge und Isotopenzusammensetzung des einzuladenden Plutoniums, konstant gehalten wurden. Insgesamt ergeben sich somit 25 Jahre Plutonium-Rezyklierungszeit und - zusammen mit den Uran-Zyklen über 3 Jahre - eine angenommene Betriebszeit der Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerke von 28 Jahren.

Mit der Rückführung von durch Wiederaufarbeitung des bestrahlten Leichtwasserreaktor-Brennstoffs gewonnenem Plutonium und Resturan in die Leichtwasserreaktoren wird eine bessere Ausnutzung des verfügbaren spaltbaren Materials erreicht. Die Rezyklierung ergäbe eine kumulierte Spaltstoffersparnis von ca. 24 % bis zum Jahre 2000 und von 34 % bis zum Jahre 2050.

#### 5. Lagerbeckenbedarf für abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren

Aus Abb. II-3 oder Tab. II-1 kann die bis zum Zeitpunkt vor Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage bereitzustellende Lagerbeckenkapazität direkt abgelesen werden, wenn man die vor Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage vorgenommene (sicher relativ ge-

ringfügige) Wiederaufarbeitung von Brennelementen außer Betracht läßt; denn in diesem Fall ist die Angabe des kumulierten Leichtwasserreaktor-Brennstoffanfalls das Maß für die Lagerbeckenkapazität. Diese bereitzustellende Lagerbeckenmenge für abgebrannte Brennelemente setzt sich zusammen aus dem Lagerbeckenangebot am Ort der Reaktoren selbst (in der Regel hat das dortige Lagerbecken die Kapazität der doppelten jährlichen Brennstoffentnahme, also beim 1300 MW<sub>e</sub>-Referenz-Leichtwasserreaktor ca. 62 t SM) sowie dem zu erstellenden Lagerbecken im Entsorgungszentrum.

Es wird zunächst angenommen, daß die projektierte 1400 jato-Anlage zur Aufarbeitung von bestrahltem Brennstoff aus Leichtwasserreaktoren im Jahre 1991 mit ihrem vollen Jahresnettodurchsatz in Betrieb geht; die vor diesem Zeitpunkt im In- und Ausland vorgenommene Wiederaufarbeitung von bestrahltem Kernbrennstoff wird nicht berücksichtigt. Dann beträgt die bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage bereitzustellende Lagerbecken-Kapazität für abgebrannte Leichtwasserreaktor-Brennelemente (im Falle des mittleren Szenarios) ca. 6700 t SM.

Tritt eine Verzögerung der Inbetriebnahme der Wiederaufarbeitungsanlage ein, so ergibt sich die Notwendigkeit, die Lagerbeckenkapazität zu erhöhen. Es wird angenommen, daß die Verzögerung gegenüber der planmäßigen Inbetriebnahme 5 Jahre betrage: Die 1400 jato-Wiederaufarbeitungsanlage nähme also ihren Vollastbetrieb im Jahr 1996 auf.

Läßt man wieder die vor diesem Zeitpunkt vorgenommenen Aufarbeitungsaktivitäten unberücksichtigt, so ergibt sich, wie aus Tab. II-1 abzulesen, bis 1995 eine bereitzustellende Lagerbeckenkapazität für abgebrannte Leichtwasserreaktor-Brennelemente von 12 500 t SM.

Bei einer Verzögerung des Wiederaufarbeitungsanlagen-Arbeitseinsatzes bis zum Jahre 1996 ergeben sich hinsichtlich der bereitzustellenden Lagerkapazität für den bestrahlten Kernbrennstoff noch keine wesent-

lichen Unterschiede für frühen oder späten Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren. Bei einem späteren Zeitpunkt des Inbetriebgehens der Wiederaufarbeitungsanlage für bestrahlten Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoff müssen jedoch je nach Szenario der Anfall von bestrahltem Brüter-Kernbrennstoff und bestrahltem Hochtemperaturreaktor-Kernbrennstoff sowie die dafür bereitzustellende Lagerbeckenkapazität mit berücksichtigt werden.

Die Option, keine Lagerbecken dieser Größenordnung zu errichten und bis zum Zeitpunkt des Inbetriebgehens der Wiederaufarbeitungsanlage die abgebrannten Leichtwasserreaktor-Brennelemente gleich endzulagern - vorausgesetzt dies sei technologisch möglich und verantwortbar -, wird nicht diskutiert.

6. Bedarf an Wiederaufarbeitungskapazität für abgebrannten Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren

Es wird angenommen, daß Wiederaufarbeitungsanlagen für abgebrannten Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren nur in folgenden Kapazitätsgrößen erstellt werden: 350 t SM/a, 700 t SM/a, 1050 t SM/a, 1400 t SM/a. Anlagen größerer Kapazität als 1400 t SM/a werden nicht gebaut. So besteht z.B. eine Anlage von 2800 t SM/a aus zwei räumlich getrennten Anlagen von je 1400 t SM/a.

Längerfristiger Abbau des gelagerten abgebrannten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren

(1) Betriebseinsatz der Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1991

Für die Entsorgung des abgebrannten Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoffs wird angenommen, daß die im Entsorgungszentrum der Bundesrepublik Deutschland errichtete Wiederaufarbeitungsanlage mit Beginn des Jahres 1991 mit 100 % ihres möglichen Nettojahresdurchsatzes von 1400 t SM in Betrieb geht; die vor diesem Zeitpunkt im In- und Ausland vorgenommene Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen bleibe im folgenden unberücksichtigt.

Es wird ferner zunächst davon ausgegangen, daß außer der 1991 in Betrieb gehenden Wiederaufarbeitungsanlage zur Entsorgung des bestrahlten Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoffs keine weitere Kapazität an Wiederaufarbeitung bis zum Jahre 2060 zur Verfügung gestellt wird.

Beim mittleren Szenario erfordert das Bereitstellen einer Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität von nur 1400 t SM/a über den betrachteten Zeitraum von 1991 bis 2060 den Aufbau einer Lagerbeckenkapazität für abgebrannte Brennelemente von einigen 10 000 t SM, wie aus Abb. II-4 ersichtlich wird. Um einen so hohen Überhang an unaufgearbeiteten Brennelementen zu vermeiden, wird daher davon ausgegangen, daß im Jahre 2001 eine weitere Wiederaufarbeitungsanlage mit einer Kapazität von 700 t SM/a in Betrieb geht, so daß von diesem Zeitpunkt an eine installierte Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität von 2100 t SM/a vorhanden sein würde. Aus Abb. II-4 ist ersichtlich, daß dann im Falle des mittleren Szenarios im Jahre 2041/42 der gesamte gelagerte abgebrannte Kernbrennstoff aufgearbeitet sein würde und von diesem Zeitpunkt an die installierte Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität

dem jährlichen Anfall von abgebrannten Brennelementen aus Leichtwasserreaktoren angepaßt werden könnte. Aus Abb. II-4 ist jedoch auch abzulesen, daß die bis zum Jahre 1991 bereitgestellte Lagerbeckenkapazität von ursprünglich ca. 6700 t SM kurzzeitig auf ca. 12 000 t SM aufgestockt werden müßte.

## (2) Betriebseinsatz der Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1996

Es sei angenommen, daß sich der Einsatz der Wiederaufarbeitungsanlage um 5 Jahre verschiebt, so daß erst ab dem Jahre 1996 die Wiederaufarbeitungsanlage mit 1400 t SM/a Nettodurchsatz in Betrieb ist.

Für das mittlere Szenario müßte laut Abb. II-4 bis zum Inbetriebgehen der Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1996 eine Lagerbeckenkapazität von ca. 12 500 t SM installiert sein. Damit überhaupt noch in der betrachteten Zeitspanne bis zum Jahre 2060 der gelagerte Brennstoff aufgearbeitet werden kann und ferner nicht Brennelementzwischenlager in einer Größenordnung von einigen 10 000 t SM erstellt werden müssen, müßte rechtzeitig eine weitere Wiederaufarbeitungsanlage in Betrieb gehen. Deshalb wird für dieses Szenario angenommen, daß ab dem Jahre 2001 eine weitere Wiederaufarbeitungsanlage mit einer Kapazität von 1400 t SM/a zum Einsatz kommt, so daß insgesamt 2800 t SM/a Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität ab diesem Zeitpunkt installiert sein würde. Wie aus Abb. II-4 hervorgeht, wäre dann die Wiederaufarbeitung des zwischengelagerten bestrahlten Kernbrennstoffs im Jahre 2026/2027 abgeschlossen. Die Lagerbeckenkapazität müßte innerhalb dieses Zeitraums kurzzeitig auf ca. 14 200 t SM erhöht werden, und die Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität könnte ab 2026/2027 der Menge der jährlich anfallenden abgebrannten Brennelemente angepaßt werden.

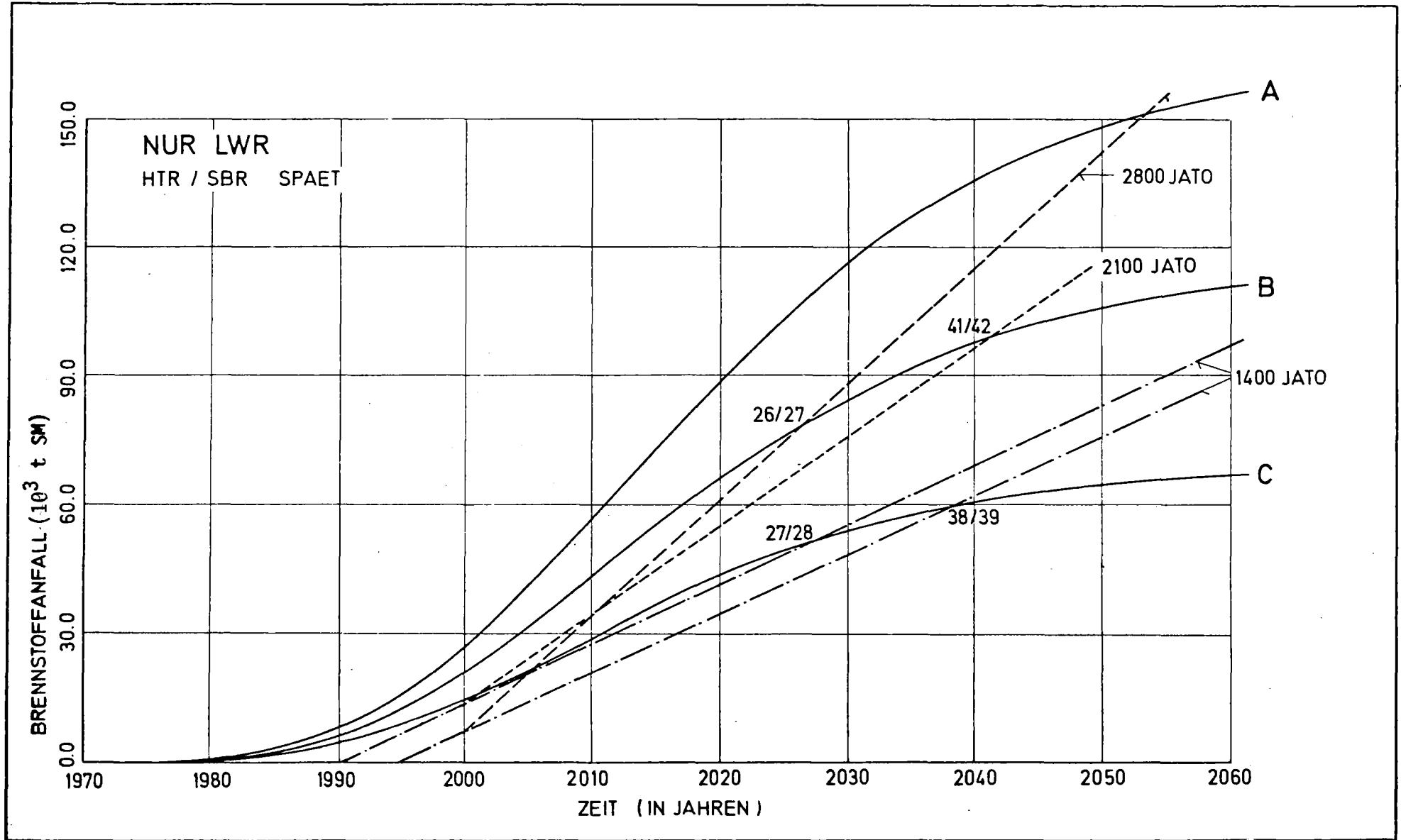


Abb. II-4: Kumulierter Brennstoffanfall aus den LWR sowie kumulierte Wiederaufarbeitungskapazität

Da beim Rezyklieren des bei der Aufarbeitung wiedergewonnenen Urans und des gewonnenen Plutoniums in den Leichtwasserreaktoren erhebliche Einsparungen an Kernbrennstoff erzielt werden und das bei der Aufarbeitung von bestrahltem Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoff gewonnene Plutonium den Schnellen Brütern als Brennstoff dienen kann, soll im folgenden Abschnitt untersucht werden, welche Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität zu installieren wären, wenn der zwischengelagerte Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoff mittelfristig, d.h. bis etwa zum Jahre 2015 bzw. 2020, aufgearbeitet sein soll.

#### Mittelfristiger Abbau des gelagerten abgebrannten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren

Es wird angenommen, daß

- nach dem Jahre 2015 bzw. 2020 die jährlich anfallenden Mengen an abgebrannten Brennelementen sofort aufgearbeitet werden, so daß ab diesem Zeitpunkt kein nennenswerter Überhang von aufzuarbeitendem Kernbrennstoff besteht,
- die im Jahre 1991 bzw. 1996 zum Arbeitseinsatz gelangende Wiederaufarbeitungsanlage eine Kapazität von 1400 t SM/Jahr aufweist,
- die kleinste Wiederaufarbeitungsanlage-Zubaueinheit 350 t SM/Jahr ist,
- die Anlagenlebensdauer 25 Jahre beträgt.

(1) Betriebseinsatz der Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1991

Geht im Falle des mittleren Szenarios mit spätem Einsatz fortgeschrittener Reaktoren die Wiederaufarbeitungsanlage mit einer Jahreskapazität von 1400 t SM im Jahre 1991 in Betrieb (vor diesem Zeitpunkt liegende Aufarbeitungsaktivitäten sollen unberücksichtigt bleiben), so errechnet sich aus Tab. II-1 eine erforderliche durchschnittliche Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität bis zum Jahre 2015 von ca. 2240 t SM/Jahr, um den angefallenen und zwischengelagerten bestrahlten Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren bis zum Jahre 2015 aufzuarbeiten. Dies bedeutet, daß nach Start des Betriebes der 1400-jährige Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1991 rechtzeitig weitere Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität in Betrieb genommen werden muß. Es wird angenommen, daß im Jahre 1996 eine weitere Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität von 1050 t SM/a installiert wird, so daß ab 1996 eine Gesamtwiederaufarbeitungskapazität von 2450 t SM/a zur Verfügung stehen würde. In Tab. II-5 sind für das betrachtete Szenario der jährliche und kumulierte Brennstoffanfall und die dem angenommenen Zubau-Fall entsprechende installierte Leichtwasserreaktor-Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität sowie der sich jeweils ergebende Überhang an abgebrannten Brennelementen angegeben. Die Aufarbeitung des gesamten zwischengelagerten bestrahlten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren würde in den Jahren 2014/2015 erreicht sein. Die im Jahre 2051 installierte Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität soll als Maximalforderung gelten, die entsprechend dem jährlich anfallenden bestrahlten Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren reduziert werden kann.



Tabelle II-5: Mittleres Szenario bei später Einführung von SBR und HTR,  
WAA-Einsatz 1991:  
Anfall abgebrannter Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren  
Installierte Wiederaufarbeitungskapazität und  
Brennelementüberhang als Funktion der Zeit (in Jahren)

JAHR	ANFALL ABGEBRANNTER LWR-BRENNELEMENTE (T SM)		LWR-WIEDERAUFARBEITUNGS- KAPAZITÄT, INSTALLIERT (T SM/A)	LWR-BRENNELEMENTÜBER- HANG, KUMULIERT (T SM)
	JAHRlich	KUMULIERT		
1990	922.5	6672.8	0.0	6672.8
1991	1014.8	7687.5	1400.0	6287.5
1992	1107.0	8794.5	1400.0	5994.5
1993	1199.3	9993.8	1400.0	5793.8
1994	1291.5	11285.3	1400.0	5685.3
1995	1414.5	12699.8	1400.0	5699.8
1996	1506.8	14206.5	2450.0	4756.5
1997	1599.0	15805.5	2450.0	3905.5
1998	1691.3	17496.8	2450.0	3146.8
1999	1783.5	19280.3	2450.0	2480.3
2000	1906.5	21186.8	2450.0	1936.8
2005	2275.5	31826.3	2450.0	326.3
2010	2429.3	43757.3	2450.0	7.3
2015	2429.3	55995.8	2450.0	0.0
2016	2429.3	58425.0	2450.0	0.0
2020	2275.5	67711.5	2450.0	0.0
2021	2214.0	69925.5	2100.0	114.0
2030	1599.0	86930.3	2100.0	0.0
2031	1537.5	88467.8	1400.0	137.5
2040	1045.5	99691.5	1050.0	0.0
2041	984.0	100675.5	1050.0	0.0
2046	768.8	104949.8	700.0	68.8
2050	645.8	107717.3	700.0	36.3
2060	369.0	112668.0	700.0	0.0
2061	338.3	113006.3	350.0	0.0

(2) Betriebseinsatz der Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1996

Es wird angenommen, daß sich der Betriebseinsatz der Anlage zur Wiederaufarbeitung von bestrahltem Kernbrennstoff mit einem Nettojahresdurchsatz von 1400 t SM um 5 Jahre verzögert, der Einsatz also erst im Jahre 1996 erfolgt.

Für das betrachtete Szenario errechnet sich dann aus Tab. II-1 für die Aufarbeitung der zwischengelagerten bestrahlten Brennelemente bis zum Jahre 2020 eine notwendige durchschnittliche Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität von ca. 2700 t SM/Jahr. Es muß infolgedessen sehr bald nach Einsatz der ersten Wiederaufarbeitungsanlage eine weitere Anlage in Betrieb gehen. Gemäß Tab. II-6 wird davon ausgegangen, daß 1998 weitere Wiederaufarbeitungskapazität von 1400 t SM/a in Betrieb sein wird, so daß insgesamt 2800 t SM/a Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität installiert wären. Der Brennelementüberhang wäre in diesem Fall im Jahre 2020/21 beseitigt. Die im Jahre 2046 zu installierende Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazität von 700 t SM kann entsprechend dem jährlich anfallenden bestrahlten Leichtwasserreaktor-Kernbrennstoff reduziert werden.

Tabelle II-6: Mittleres Szenario bei später Einführung von SBR und HTR,  
WAA-Einsatz 1996:  
Anfall abgebrannter Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren  
Installierte Wiederaufarbeitungskapazität und  
Brennelementüberhang als Funktion der Zeit (in Jahren)

JAHR	ANFALL ABGEBRANNTER LWR-BRENNELEMENTE (T SM)		LWR-WIEDERAUFARBEITUNGS- KAPAZITAET, INSTALLIERT (T SM/A)	LWR-BRENNELEMENTUEBER- HANG, KUMULIERT (T SM)
	JAEHRLICH	KUMULIERT		
1995	1414.5	12699.8	0.0	12699.8
1996	1506.8	14206.5	1400.0	12806.5
1997	1599.0	15805.5	1400.0	13005.5
1998	1691.3	17496.8	2800.0	11896.8
1999	1783.5	19280.3	2800.0	10880.3
2000	1906.5	21186.8	2800.0	9986.8
2005	2275.5	31826.3	2800.0	6626.3
2010	2429.3	43757.3	2800.0	4557.3
2015	2429.3	55995.8	2800.0	2795.8
2020	2275.5	67711.5	2800.0	511.5
2021	2214.0	69925.5	2800.0	0.0
2023	2091.0	74169.0	1750.0	341.0
2030	1599.0	86930.3	1750.0	852.3
2040	1045.5	99691.5	1750.0	0.0
2041	984.0	100675.5	1050.0	0.0
2046	768.8	104949.8	700.0	68.8
2050	645.8	107717.3	700.0	36.3
2060	369.0	112668.0	700.0	0.0
2061	338.3	113006.3	350.0	0.0

In Tab. II-7 sind für das betrachtete Szenario nochmals die installierten Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazitäten sowie der im Zeitraum von 1991 bis 2060 vorzunehmende Zubau an solchen Kapazitäten für die gewählten Zeitpunkte des Arbeitseinsatzes der ersten Wiederaufarbeitungsanlage (1991, 1996) zusammengestellt worden.

Tabelle II-7: Mittleres Szenario, später Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren: Zuzubauende und installierte Kapazität zur Aufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren

Jahr	Wiederaufarbeitungsanlage-Arbeitseinsatz 1991		Wiederaufarbeitungsanlage-Arbeitseinsatz 1996	
	Wiederaufarbeitungsanlage-Kapazität Zubau	Wiederaufarbeitungsanlage-Kapazität installiert	Wiederaufarbeitungsanlage-Kapazität Zubau	Wiederaufarbeitungsanlage-Kapazität installiert
	t SM/a	t SM/a	t SM/a	t SM/a
1991	1400	1400	0	0
1996	1050	2450	1400	1400
1998	-	2450	1400	2800
2016	1400	2450	-	2800
2021	700	2100	1400	2800
2023	-	2100	350	1750
2041	350	1050	-	1050
2046	350	700	700	700
2061	-	350	-	350

7. Bedarf an Wiederaufarbeitungskapazität für bestrahlten Kernbrennstoff aus Schnellen Brutreaktoren

Für die Aufarbeitung der abgebrannten Brennelemente aus Schnellen Brutreaktoren wird angenommen, daß die Aufarbeitung direkt nach der Entladung aus dem Reaktor und entsprechender Kühlzeit vorgenommen wird; es soll also keine längerfristige Lagerung der Brennelemente stattfinden. Dies bedeutet, daß sich die erforderliche Wiederaufarbeitungskapazität für die bestrahlten Brennelemente unter Berücksichtigung der Abkühlzeit unmittelbar aus den Angaben über den Anfall von bestrahltem Brennstoff aus Schnellen Brutreaktoren in Tab. II-2 ergibt.

8. Bedarf an Wiederaufarbeitungskapazität für bestrahlten Kernbrennstoff aus Hochtemperaturreaktoren

Es wird wieder angenommen, daß die aus den Hochtemperaturreaktoren entladenen abgebrannten Brennelemente sofort nach entsprechender Kühlzeit aufgearbeitet werden, so daß sich auch hier die zu installierenden Wiederaufarbeitungsanlagen-Kapazitäten unmittelbar aus dem zeitlichen Verlauf des jährlich anfallenden Kernbrennstoffs nach Tab. II-3 ergeben.

9. Mengenanfall von radioaktivem Abfall aus den Wiederaufarbeitungsanlagen

Für alle Reaktortypen werden für den verfestigten radioaktiven Abfall (Waste) pro Tonne Schwermetall (SM) folgende Daten angenommen:

- Hoch-(radio)aktiver Abfall :  $0,07 \text{ m}^3/\text{t SM}$ ,
- Mittel-(radio)aktiver Abfall :  $3,0 \text{ m}^3/\text{t SM}$ ,

- Schwach-(radio)aktiver Abfall :  $10 \text{ m}^3/\text{t SM}$ .

Hinsichtlich der spezifischen Aktivität gelten für die aufgeführten Abfallkategorien (flüssige Phase) folgende Vereinbarungen:

- Hoch-(radio)aktiver Abfall :  $> 10^4 \text{ Ci/m}^3$ ,
- Mittel-(radio)aktiver Abfall :  $10^{-1}$  bis  $10^4 \text{ Ci/m}^3$ ,
- Schwach-(radio)aktiver Abfall :  $< 10^{-1} \text{ Ci/m}^3$ .

Bei der Berechnung der Abfallmengen wird davon ausgegangen, daß der radioaktive Abfall in verfestigter Form ein Jahr nach Beginn der Wiederaufarbeitung des abgebrannten Kernbrennstoffs vorliegt. Durch die tatsächlichen Gegebenheiten der Wiederaufarbeitung wird der zeitliche Verlauf des Anfalls von radioaktivem Abfall sich zwar anders gestalten; jedoch bleiben die über den betrachteten Zeitraum insgesamt anfallenden Mengen gleich.

Es ergeben sich für das betrachtete Szenario und bei Annahme eines hohen Abbrandes des Brennstoffs aus Hochtemperaturreaktoren folgende kumulierte Abfallmengen:

- Schwach-(radio)aktiver Abfall : ca.  $1,7 \times 10^5 \text{ m}^3$  bis zum Jahre 2000  
ca.  $6,5 \times 10^5 \text{ m}^3$  bis zum Jahre 2020  
ca.  $1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$  bis zum Jahre 2050
- Mittel-(radio)aktiver Abfall : ca.  $5,2 \times 10^4 \text{ m}^3$  bis zum Jahre 2000  
ca.  $2,0 \times 10^5 \text{ m}^3$  bis zum Jahre 2020  
ca.  $4,2 \times 10^5 \text{ m}^3$  bis zum Jahre 2050

Der kumulierte Anfall des gesamten hoch-(radio)aktiven Abfalls aus Leichtwasserreaktoren, Schnellen Brutreaktoren und Hochtemperaturreaktoren bei hohem Abbrand des Brennstoffs aus Hochtemperaturreaktoren ( $90\,000 \text{ MWd/t}$ ) für das betrachtete Szenario kann der Abb. II-5 entnommen werden.

Die Endlagerung der anfallenden Mengen von mittel-(radio)aktivem Abfall und schwach-(radio)aktivem Abfall in einem Salzstock wird nach derzeitigem Kenntnisstand keine grundlegenden Schwierigkeiten mit sich bringen. Schwieriger gestaltet sich die Endlagerungsfrage beim hoch-(radio)aktiven Abfall.

Der hoch-(radio)aktive Abfall soll verfestigt als Glaszylinder von 20 cm Durchmesser und 1 m Höhe vorliegen, entsprechend einem Volumen von ca.  $0,032 \text{ m}^3$ . Ein Bohrloch von 50 m Tiefe im Salzstock kann damit das Volumen von ca.  $1,57 \text{ m}^3$  hoch-(radio)aktivem Abfall (verfestigt) aufnehmen.

Aus den Angaben in Abb. II-5 läßt sich die Anzahl der notwendigen Bohrlöcher von 50 m Tiefe und 20 cm Durchmesser errechnen:

- 566 bis zum Jahre 2000 (für  $889 \text{ m}^3$  hoch-(radio)aktiven Abfall, verfestigt),
- 1963 bis zum Jahre 2015 (für  $3082 \text{ m}^3$  hoch-(radio)aktiven Abfall, verfestigt),
- 5877 bis zum Jahre 2050 (für  $9226 \text{ m}^3$  hoch-(radio)aktiven Abfall, verfestigt).

Je nach spezifischer Aktivität und Alter des hoch-(radio)aktiven Abfalls sind Abstände zwischen den Bohrlöchern von 5 m bis 18 m erforderlich. Bei einem mittleren Abstand von 10 m ergibt sich bei Anordnung der Bohrlöcher in einer Ebene folgender Flächenbedarf:

- für 566 Bohrlöcher ca.  $49\,000 \text{ m}^2$  entsprechend ca. 211 m x 211 m,
- für 1962 Bohrlöcher ca.  $170\,000 \text{ m}^2$  entsprechend 412 m x 412 m,
- für 5877 Bohrlöcher ca.  $509\,000 \text{ m}^2$  entsprechend ca. 713 m x 713 m.

Der Salzstock Gorleben weist eine größte Länge von rd. 14 km und eine größte Breite von über 4 km auf.

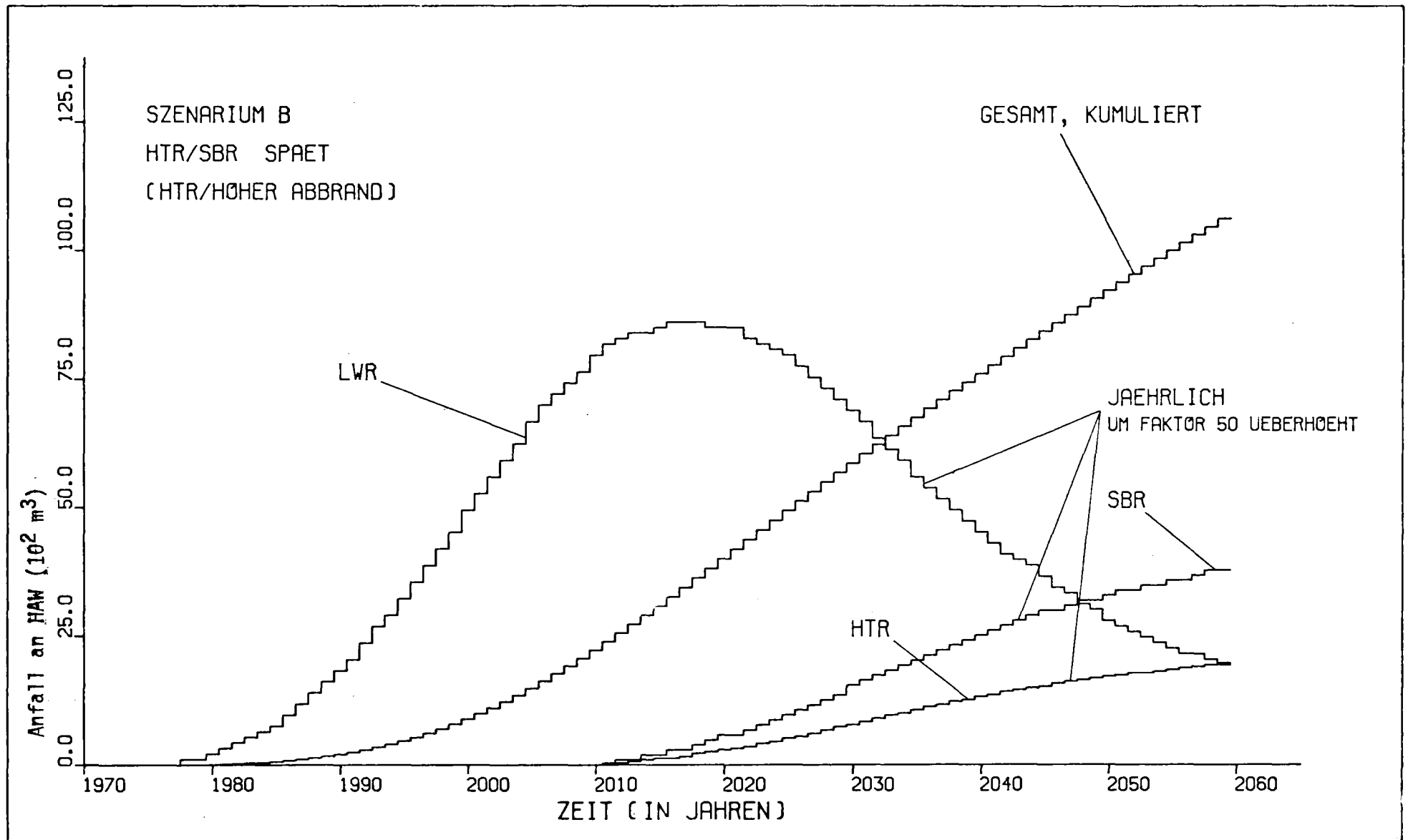


Abb. 11-5: Jährlicher und kumulierter Anfall von hoch-(radio)aktivem Abfall (HAW) (verfestigt) bei Aufarbeitung des bestrahlten Kernbrennstoffs aus Leichtwasserreaktoren (LWR), Schnellen Brutreaktoren (SBR) und Hochtemperaturreaktoren (HTR, Hoher Abbrand) für das Mittlere Szenario bei spätem Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren als Funktion der Zeit (in Kalenderjahren)



## 10. Anzahl der Transporte zur Wiederaufarbeitungsanlage und der benötigten Transportbehälter

Bei der Ermittlung der aufzubringenden Transportleistungen für abgebrannte Brennelemente wird der Einsatz von Transportbehältern mit folgender Kapazität angenommen:

- für den Leichtwasserreaktor: 5 t SM
- für den Schnellen Brutreaktor: 2 t SM
- für den Hochtemperaturreaktor: 3 t SM (niedriger Abbrand = 30 000 MWd/t)  
0,6 t SM (hoher Abbrand = 90 000 MWd/t).

Der Transport abgebrannter Brennelemente soll per Bahn erfolgen, und zwar durch Einzelwaggons (je 1 Behälter) oder durch Sonderzüge (je 6 Waggons). Als Behälterumlaufzeit wurde für alle Reaktortypen eine Zeitspanne von 14 Tagen angenommen.

Die Anzahl der jährlichen Transporte zu den Wiederaufarbeitungsanlagen, welche in einem Entsorgungszentrum angeordnet sein sollen, können für das betrachtete Szenario bei Annahme eines hohen Abbrandes des Brennstoffs in Hochtemperaturreaktoren (90 000 MWd/t) aus Abb. II-6 entnommen werden und belaufen sich insgesamt auf

- ca. 360 im Jahre 2000
- ca. 800 im Jahre 2020
- ca. 1500 im Jahre 2050.

Wie aus Abb. II-6 ferner zu entnehmen ist, ist die Anzahl der Transporte für die abgebrannten Brennelemente nur aus den Hochtemperaturreaktoren für das Fallbeispiel "hoher Abbrand" trotz des geringeren Brennstoffanfalls größer als für das Fallbeispiel "niedriger Abbrand", weil bei hohem Abbrand eine kleinere Behälterkapazität zugrundegelegt wird.

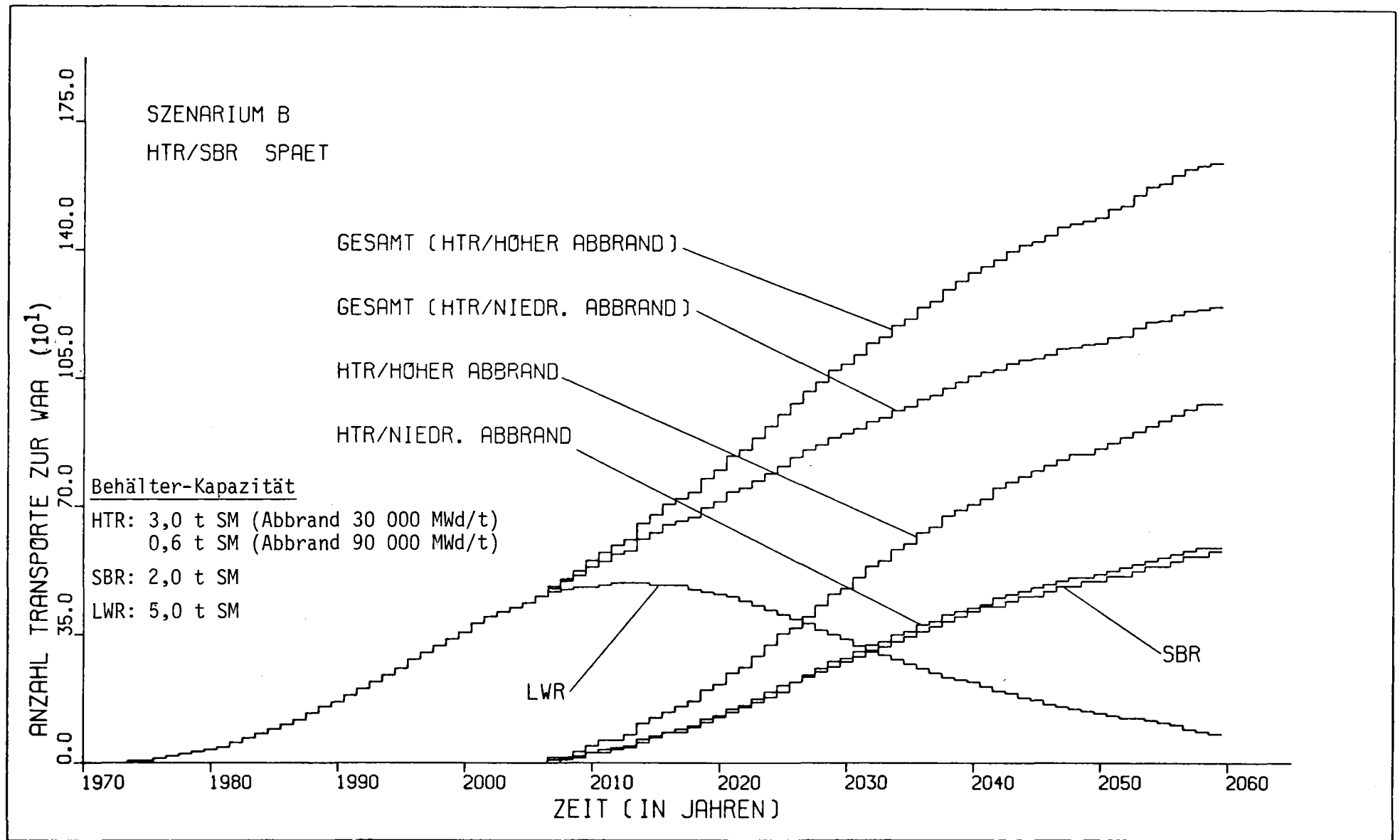


Abb. II-6: Anzahl der jährlichen Transporte von abgebrannten Brennelementen zu den Wiederaufarbeitungsanlagen als Funktion der Zeit (in Kalenderjahren) für das Mittlere Szenario bei spätem Einsatz der fortgeschrittenen Reaktoren

Die Anzahl der jährlichen Transporte zur Wiederaufarbeitungsanlage nur für den bestrahlten Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren beläuft sich auf ca. 260 im Jahre 1995, erreicht ihr Maximum mit ca. 490 in den Jahren 2012 bis 2014 und fällt auf ca. 135 Transporte im Jahre 2050.

Die Anzahl der Behälter, die allein für den Transport von abgebrannten Brennelementen aus Leichtwasserreaktoren benötigt werden, erreicht mit ca. 19 Stück in den Jahren 2012 bis 2014 ihr Maximum.

Für die Entsorgung der Kernkraftwerke insgesamt (hoher Abbrand des Brennstoffs in Hochtemperaturreaktoren) werden

- ca. 14 Behälter im Jahre 2000
- ca. 31 Behälter im Jahre 2020
- ca. 58 Behälter im Jahre 2050

benötigt.

In einem weiteren Kapitel des Teils II der Studie wird auf Stand, Entwicklungsmöglichkeiten und Probleme der Wiederaufarbeitungstechnik (für abgebrannte Brennelemente aus LWR, SBR und HTR) und der Technik der Behandlung und Lagerung von radioaktiven Abfällen sowie auf die Problematik der Beseitigung stillgelegter Kernkraftwerke eingegangen.

### III. Wirtschaftliche Fragen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

#### 1. Einführung

In der öffentlichen Diskussion um die Kernenergie ist zunehmend auch die Frage nach der volkswirtschaftlichen Notwendigkeit eines Einsatzes der Kernenergie in großem Maßstab aufgeworfen worden. Im Rahmen der Studie "Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie" wird deshalb auch auf die Bedeutung der Kernenergie für die zukünftige Energieversorgung und auf damit zusammenhängende Fragen eingegangen, die die Folgen einer Verzögerung des Kernenergieausbaus, die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie, die Finanzierbarkeit des Kernenergieeinsatzes sowie die volkswirtschaftliche Bedeutung des Exports kerntechnischer Anlagen betreffen.

#### 2. Kernenergienutzung bei Verwirklichung wirtschafts- und energiepolitischer Hauptziele

In diesem Kapitel wird der zukünftige Bedarf an Kernenergie im Rahmen von Modelldarstellungen der Energieversorgung bei Verwirklichung gesamtwirtschaftlicher Zielsetzungen begründet. Beanspruchungen von Kernbrennstoff und Kernkraftwerksleistung werden als Bestandteil von Energieversorgungszuständen dargestellt, die wirtschafts- und energiepolitischen Sollzuständen entsprechen, und haben insofern normativen Charakter. Dieses Vorgehen entspringt dem Anliegen, die üblichen bedingten Energieprognosen durch Projektionen zu ergänzen, welche die anzustrebende Entwicklung unseres Energiesystems markieren und Begründungen für Maßnahmen zur Verstärkung zielkonformer Tendenzen liefern.

In der kurz- bis mittelfristigen Perspektive bis 1985 und 1990 stellt die Wiederherstellung der Vollbeschäftigung in Anbetracht des bis zum Ende der 80er Jahre zunehmenden demographisch bedingten Angebotsdrucks auf dem Arbeitsmarkt die übergeordnete Zielsetzung dar, der die Energiewirtschaft durch bedarfsorientierte und ausreichende Bereitstellung möglichst preisgünstiger Energie gerecht werden soll.

In der längerfristigen Perspektive bis zum Jahre 2000 tritt in Anbetracht schwindender Erdölvorräte die Forderung nach Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit durch Umstrukturierung des Verbrauchs in Richtung auf möglichst geringen Ölanteil in den Vordergrund.

## 2.1 Kernenergieeinsatz bei Vollbeschäftigung

### Projektion "Vollbeschäftigung 1985"

Unter Berücksichtigung des sich im Laufe der nächsten 7 Jahre um 0,8 Mio vergrößernden Erwerbspersonenpotentials und der heutigen Arbeitslosenzahl bedeutet Vollbeschäftigung im Jahre 1985, daß 1,6 Mio Arbeitsplätze mehr besetzt sein müssen als 1977, nämlich 27,3 Mio. Um diesen Beschäftigungsstand zu erreichen, müßte das Bruttosozialprodukt (BSP) bei einem Fortschritt der Arbeitsproduktivität von 4,3 %/a<sup>+</sup> um jährlich 5,1 % wachsen. Arbeitsmarktpolitischen Maßnahmen zur Reduzierung des Arbeitsangebots kann in diesem Zusammenhang lediglich eine flankierende Bedeutung beigegeben werden.

---

<sup>+</sup>) Die Produktivitätsannahme wurde aus Modellrechnungen des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung von 1976/77 übernommen. Sie berücksichtigt eine Arbeitszeitverkürzung von 0,8 % pro Jahr.

Bei einer 7-prozentigen Verbesserung des spezifischen volkswirtschaftlichen Primärenergieverbrauches (SEV = kg SKE pro 1000 DM BSP) gegenüber dem Durchschnitt der Boom-Periode 1960-1973 würde der Primärenergieverbrauch (PEV) bei Erreichen der Vollbeschäftigung im Jahre 1985 auf 550 Mio t SKE steigen. Im Rahmen früherer offizieller Prognosen dieser Größenordnung, namentlich in der im Oktober 74 veröffentlichten "Ersten Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung", galten ein Uranbeitrag von rd. 80 Mio t SKE und eine entsprechende Kernkraftwerksleistung von 45 GW<sub>e</sub> als versorgungswirtschaftlich erwünscht und technisch-organisatorisch realisierbar. Bei dieser Kernenergienutzung und energiepolitischem status quo ergibt sich die in Tabelle III-1, Spalte II dargestellte Projektion "Vollbeschäftigung 1985". Im Rahmen dieser Projektion steigt die Stromerzeugung ab 1978 mit durchschnittlich 6,6 %/a, was im wesentlichen auf der Annahme einer Stromverbrauchs-BSP-Elastizität von 1,3 beruht, wie sie für die Zeit von 1963 bis 1976 für den industriellen Stromverbrauch galt.

Es ist möglich und zu hoffen, daß der spezifische Primärenergie-Einsatz in den kommenden Jahren weiter absinkt. Wenn man sich von den jüngsten Energiesparprogrammen auf Bundes- und Länderebene eine tendenzielle Wirkung in dieser Richtung verspricht, so ist bei Energiebedarfsschätzungen zu berücksichtigen, daß das Hauptgewicht der öffentlichen Einsparmaßnahmen auf der rationelleren Nutzung von Öl und Gas zu Heizzwecken liegt. Auf die Stromnachfrage hat dies aller Voraussicht nach keinen abschwächenden Effekt, so daß kein Grund besteht, unter Einsparaspekten den zukünftigen Brennstoffeinsatz der Kraftwerke niedriger anzusetzen als unter status-quo-Bedingungen. Selbst wenn man eine drastische Senkung der Energie-Intensität um beispielsweise 10 % für möglich hält und fordert, daß sie auch für Strom jedweder Erzeugungsart zu gelten habe, so würde das an der aufgezeigten Dimension des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie bei Vollbeschäftigungsstrategie nur wenig ändern.

Tabelle III-1: Übersicht zur Kernenergienutzung bei Verwirklichung wirtschafts- und energiepolitischer Hauptziele

Primärenergieträgerverbrauch (PEV) (in Mio t SKE)	I		II		III		IV		V	
	1978		1985		1985		1990		2000	
Kohle	98	26 %	115	21 %	120	24 %	135	22 %	150	24 %
Öl	198	52 %	240	44 %	232	45 %	254	40 %	150	24 %
Gas	61	16 %	100	18 %	92	18 %	112	18 %	100	16 %
Uran	16	4 %	83	15 %	52	10 %	108	17 %	200 <sup>++)</sup>	32 %
Sonstige	10	2 %	12	2 %	14	3 %	16	3 %	25	4 %
<b>Total</b>	<b>383</b>	<b>100 %</b>	<b>550</b>	<b>100 %</b>	<b>510</b>	<b>100 %</b>	<b>625</b>	<b>100 %</b>	<b>625</b>	<b>100 %</b>
Bruttosozialprodukt (Preisbasis 1962)	642 Mrd DM		930 Mrd DM		893 Mrd DM		1130 Mrd DM		1260 Mrd DM	
Spezif. Energieverbrauch	597	kg/1000 DM	591	kg/1000 DM	571	kg/1000 DM	553	kg/1000 DM	496	kg/1000 DM
Kraftwerksleistung (br.)	88	GW <sub>e</sub>	125	GW <sub>e</sub>	114	GW <sub>e</sub>	139	GW <sub>e</sub>	180	GW <sub>e</sub>
davon KKW-Leistung	9,6	GW <sub>e</sub>	45	GW <sub>e</sub> <sup>+) )</sup>	26	GW <sub>e</sub>	53	GW <sub>e</sub>	95	GW <sub>e</sub>
Stromerzeugung (br.)	348	TWh	560	TWh	540	TWh	730	TWh	960	TWh
davon KKW-Strom	50	TWh	260	TWh <sup>+) )</sup>	164	TWh	342	TWh	610	TWh
Einsatz in Kraftwerken	113	Mio t SKE	180	Mio t SKE	173	Mio t SKE	232	Mio t SKE	306	Mio t SKE

Spaltenüberschriften: I: Schätzung aufgrund der Halbjahreswerte; II u. IV: Vollbeschäftigung; III: Exponentielle Interpolation 1978-1990; V: Ölverbrauchsminimum

<sup>+) )</sup> Die in Anbetracht der installierten Kernkraftwerksleistung niedrige Kernstromerzeugung erklärt sich aus der Annahme, daß die 45 GW<sub>e</sub> erst Ende des Jahres 1985 zur Verfügung stehen.

<sup>++)</sup> Incl. nukleare Fernwärme und Fernenergie

### Projektion "Vollbeschäftigung 1990"

Ende der 80er Jahre wird der Höhepunkt des Erwerbspersonenpotentials überschritten, und bei etwas geringerer Arbeitsproduktivitätszunahme von 3,7 %/a reicht ein BSP-Wachstum von durchschnittlich 4 % pro Jahr aus, um den Vollbeschäftigungszustand über 1985 hinaus aufrechtzuerhalten und 1990 etwa 1,9 Mio Personen mehr zu beschäftigen als 1977. Das BSP auf Preisbasis 1962 belief sich dann auf 1130 Mrd DM.

Anstatt den zugehörigen PEV mit Hilfe einer einzigen SEV-Schätzung zu ermitteln, wird zunächst der Primärenergiebedarf der Kraftwerke und anschließend der PEV für die übrigen Einsatzzwecke abgeschätzt. Bei einem verlangsamten Stromverbrauchswachstum ab 1986 von etwa 5,5 %/a und einer Verbesserung des spezifischen Brennstoffverbrauchs von 328 g in 1977 auf 318 g SKE pro erzeugter kWh sind 1990 etwa 232 Mio t SKE zur Stromerzeugung erforderlich. Unterstellt man einen gegenüber der Vollbeschäftigungsprojektion 1985 leicht erhöhten Kernstromanteil von 47 % und eine durchschnittliche Ausnutzungsdauer der Kernkraftwerke von 6500 h, so kommt man auf einen Bedarf von 108 Mio t Uran für 53 GW<sub>e</sub> installierte Kernkraftwerksleistung.

Nimmt man an, daß sich der SEV bezüglich der anderen Verwendungsrichtungen von 414 kg/1000 DM BSP in 1977 um 16 % auf 348 kg verringert, so besteht ein Restbedarf von 393 Mio t, und es ergibt sich ein Gesamt-PEV 1990 von 625 Mio t SKE. Der durchschnittliche SEV betrüge dann 553 kg und wäre damit um 13 % bzw. 8 % niedriger als 1960-73 bzw. 1973-78.

Die Aufteilung des PEV-Restes von 393 Mio t auf die Primärenergieträger erfolgt im wesentlichen durch Fortschreibung der um den Kraftwerksbedarf verringerten Beiträge der einzelnen Energieträger zur Gesamtversorgung in 1985, unter Berücksichtigung einer Ölsubstitution durch Elektrizität in Höhe von 20 Mio t SKE. Es ergibt sich daraus das in Spalte IV der Tabelle III-1 wiedergegebene Bild der Primärenergieversorgung 1990 bei



Vollbeschäftigung. Der für 1990 bei Vollbeschäftigungswachstum errechnete PEV von 625 Mio t ist als Maximalbedarf bei Strukturkonstanz der Produktion, nüchterner Einschätzung der marktwirtschaftlich erreichbaren Senkung des SEV und beginnender Ölsubstitution durch Elektrizität anzusehen.

Es gibt im wesentlichen zwei Kategorien von Einflüssen, die einen niedrigeren PEV in 1990 bewirken könnten:

- (1) Schwächeres Steigen des Sozialprodukts, als hier in Form der Wachstumsraten 5,1 % (1978-85) und 4,0 % (1986-90) aus beschäftigungspolitischen Gründen postuliert wurde (Niveauelemente der Energie-Einsparung). Dies bedeutet nicht notwendigerweise eine schlechtere Beschäftigungslage, denn es ist nicht auszuschließen, daß im Zuge struktureller Veränderungen in der Produktion und Verkürzungen der täglichen oder jährlichen Arbeitszeit die Produktivität je Beschäftigten langsamer steigt, als hier angenommen wurde (durchschnittlich 4 %/a ab 1978).
- (2) Stärkeres Sinken des spezifischen Energieverbrauchs der Sozialprodukterstellung, als es den hier angenommenen -0,6 %/a ab 1978 entspricht (Effizienzkomponente der Energie-Einsparung).

Dies kann sowohl durch noch rationellere Nutzung der Energie in allen bisherigen Verwendungen, als auch durch das Aufkommen von neuen Verwendungszwecken mit geringer Energie-Intensität verursacht werden. Im ersten Falle ist an eine höhere preisinduzierte Substitutionalität von Energie und Kapital sowie an eventuell notwendige administrative Zwangsmaßnahmen zu denken. Für den zweiten Fall spricht die These von der langfristigen Dominanz des Dienstleistungssektors. Ein entsprechender Trend ist z.Zt. allerdings noch nicht deutlich zu erkennen.

Aus Tabelle III-1 (Spalte IV) geht hervor, daß trotz eines aus heutiger Sicht außerordentlich hohen Beitrags der Kernenergie von 108 Mio t SKE (17 %) die Beiträge der fossilen Energieträger zum Primärenergieaufkommen 1990 im Vergleich zu heute einen Umfang annehmen, der weder technisch-wirtschaftlich noch politisch garantiert werden kann. Deshalb ist im Unterschied zur Projektion 1985 (Tab. III-1, Spalte II) die für 1990 bei Vollbeschäftigung angegebene Dimension der Kernenergie-Nutzung, symbolisiert durch eine installierte Leistung von 53 GW, nicht mehr als wirtschaftlich plausible Obergrenze, sondern als unbedingt notwendiges Planziel zu werten.

#### Alternativprojektion 1985

Da das zum Erreichen der Vollbeschäftigung bis 1985 erforderliche BSP-Wachstum aus heutiger Sicht kaum realisierbar erscheint und das Erwerbspersonenpotential erst 1988 sein Maximum erreichen wird, ist eine wirtschaftspolitische Strategie in Betracht zu ziehen, welche die Wiederherstellung des Vollbeschäftigungszustandes um 5 Jahre auf 1990 verschiebt.

Überträgt man die für den Projektionszeitraum 1978-90 errechneten durchschnittlichen Wachstumsraten von BSP, PEV, Stromerzeugung etc. auf den Zeitraum 1978-85, so erhält man in etwa die in Tab. III-1, Spalte III dargestellte "Alternativprojektion 1985 auf der Basis exponentieller Interpolation". Der Uranbeitrag zum gesamten PEV von 510 Mio t SKE beträgt hier 10 %.

Dieser unter günstigsten Umständen bis 1985 realisierbar erscheinende Kernenergie-Beitrag ist allerdings so knapp bemessen, daß der Einsatz fossiler Brennstoffe in den Kraftwerken gegenüber heute um 25 % höher sein müßte. Allein der Kohle-Einsatz bedarf einer 20 %-Aufstockung von 61 auf 73 Mio t SKE, doch dies dürfte noch im Rahmen der in- und ausländischen Beschaffungsmöglichkeiten liegen.

Bei Hinausschiebung des Vollbeschäftigungszustands auf 1990 hat man in 1985 mit etwa ebensoviel Arbeitslosen zu rechnen, wie im Frühjahr 1978 registriert waren, nämlich mit 0,9 Mio. Da aber das Erwerbspersonenpotential bis dahin um 0,8 Mio wächst, genügt die als alternative Projektion skizzierte Energieversorgung 1985 immerhin einem BSP-Wachstum von 4,8 %/a ab 1978, das gerade den natürlichen Zuwachs an Erwerbspersonen absorbiert.

## 2.2 Kernenergieeinsatz bei zuverlässiger und umweltschonender Energieversorgung

In der langfristigen Perspektive bis zum Jahre 2000 treten die energiepolitischen Zielsetzungen der Zuverlässigkeit (passive Sicherheit) und Umweltverträglichkeit (aktive Sicherheit) der Versorgung gegenüber den Forderungen nach bedarfsorientiert ausreichendem und möglichst preisgünstigem Energieangebot in den Vordergrund.

Bewertet man die Primärenergieträger in bezug auf ihre Vor- und Nachteile für die aktive und die passive Versorgungssicherheit, so wird man die Frage nach der per Saldo "sichersten Energie" kaum eindeutig beantworten können (Kohle oder Uran). Dagegen kommt man auch bei sehr unterschiedlicher Gewichtung der Bewertungskriterien (Ziele) bei der Identifizierung der "unsichersten Energie" in jedem Falle zu dem Ergebnis, daß mit dem Erdöl, dessen Verfügbarkeitsgrenzen immer deutlicher werden, die größten Unsicherheiten für die bundesdeutsche Energieversorgung verbunden sind.

In den Jahren 1974 bis 1977 lag der PEV-Anteil des Erdöls fast unverändert bei 52 %, und auch im Jahre 1978 wird diese Kennziffer unserer Ölabhängigkeit nicht günstiger ausfallen, d.h. es muß mit einem Erdölbeitrag von gut 200 Mio t SKE gerechnet werden.

Während der 80er Jahre dürfte die Beibehaltung der gegenwärtigen Versorgungsstruktur auch bei konjunkturell bedingtem Ansteigen des Ölbedarfs

möglich sein. Im Laufe der 90er Jahre ist jedoch die Beseitigung der Öldominanz in der Bundesrepublik Deutschland zwingend erforderlich, wenn Versorgungsnotstände vermieden werden sollen, welche die Befriedigung elementarer Bedürfnisse in Frage stellen. Dazu genügt nicht die Senkung des relativen Anteils des Mineralöls am Gesamtbedarf; die entscheidende Tendenzwende in der Verbrauchsstruktur im Sinne der energiepolitischen Hauptzielsetzung der Versorgungssicherheit tritt erst dann ein, wenn der Erdölbeitrag zum Primärenergieaufkommen nicht nur relativ, sondern auch absolut sinkt. In Anbetracht der Reichweite der Erdölreserven, die bei Aufrechterhaltung der derzeitigen Fördermenge nur noch auf 30 Jahre geschätzt wird /SHELL Briefing Service (Dez. 77) u. ESSO (1978)/, müßte diese Wende bis zum Jahre 2000 deutlich vollzogen sein. Eine Politik zur Gewährleistung der Energieversorgungssicherheit muß demnach vor allem darauf gerichtet sein, unsere nationale Ölabhängigkeit zu verringern.

#### Verringerung der Ölabhängigkeit

Betrachtet man die Endenergieformen auf Mineralölbasis unter dem Gesichtspunkt ihrer Substituierbarkeit in den verschiedenen Verwendungsrichtungen, so sind die Kraftstoffe (Benzin, Diesel, etc.) im Straßenverkehr, in der Landwirtschaft, der Binnenschifffahrt, der Luftfahrt, bei der Bundesbahn und beim Militär als die bis zum Jahre 2000 am wenigsten ersetzbaren Energieformen zu bezeichnen. Hinzu kommt der Bedarf der Petrochemie an Erdölprodukten, vor allem Rohbenzin, für nichtenergetische Zwecke. Der hier gewählte Ansatzpunkt zur Aufstellung eines Öl-Minimalverbrauchs-Szenarios besteht darin, daß der nichtenergetische Bedarf der chemischen Industrie und der Treibstoffbedarf des Verkehrs als nur partiell substituierbar betrachtet werden und daß dieser Bedarf den zukünftigen Mindestbedarf an Erdöl determinieren wird. Die Wärmeversorgung muß dann mittels des bei der Treibstoffherzeugung anfallenden Heizöls, im übrigen stark diversifiziert mittels Fernwärme, Fernenergie (Synthesegas), Erdgas, Strom und regenerativer Energiequellen unter Einsatz neuer Technologien zur Individualversorgung (Wärmepumpen etc.) erfolgen.

### Mindestbedarf an Rohöl

Nimmt man an, daß der PKW-Bestand von gegenwärtig 21,6 Mio einer Obergrenze von 24 Mio im Jahre 2000 zustrebt, so würde ceteris paribus der Benzinverbrauch im Straßenverkehr von 31 Mio t SKE im Jahre 1976 auf 39 Mio t SKE im Jahre 2000 steigen. Er verringert sich unter folgenden Voraussetzungen auf 21 Mio t SKE:

- ungefähr 10 % geringere durchschnittliche Fahrleistung je PKW.  
Einsparung: 3,5 Mio t SKE.
- ungefähr 15 % Treibstoffverbrauchssenkung durch Verbesserung des Otto-Motors, der Fahrzeugform und der Fahrweise sowie durch Verringerung des Fahrzeuggewichts.  
Einsparung: 5,7 Mio t SKE.
- allgemeine Verwendung eines Vergaserkraftstoffs mit 20 % Methanol-Volumenanteil.  
Substitution: 2,4 Mio t SKE.
- 2 Mio PKW und Kombiwagen mit Elektro-Motor oder anderem unkonventionellen Antrieb (Wasserstoff, Synthesegas).  
Substitution: 2,6 Mio t SKE.
- Zunahme des Diesel-PKW-Bestandes von 0,7 Mio in 1976 (3,7 % Anteil) auf 3,6 Mio Einheiten (15 % Anteil).  
Substitution: 3,8 Mio t SKE.

Eine solche Menge Motorenbenzin könnte von den inländischen Raffinerien bei der gegenwärtigen Ausbeutestruktur aus einem Rohöleinsatz auf dem Niveau von 1976, nämlich aus rd. 150 Mio t SKE, erzeugt werden. Weiterhin würden die in Tabelle III-2, Spalte 1 ausgewiesenen Mengen an anderen Mineralölprodukten anfallen. Diesen Mengen ist in Spalte 2 von Tabelle III-2 der geschätzte Bedarf an diesen Mineralölprodukten im Jahre 2000 gegenübergestellt.

Tabelle III-2: Erzeugung von und Bedarf an Mineralölprodukten im Jahr 2000 ( in Mio t SKE)

	Erzeugung aus 150 Mio t SKE Rohöleinsatz	geschätzter Bedarf
Benzin	21	21
Leichtes Heizöl	57	107 +)
Schweres Heizöl	35	40
Rohbenzin	6	20

+ ) 17 für Dieselkraftstoff; 90 für Raum- und Prozeßwärmeerzeugung

Der vermutete Bedarf an Rohbenzin von 20 Mio t SKE würde bei diesem Rohöleinsatz nur zu gerade 30 % gedeckt. Unterstellt man, daß die gleiche Menge von 6 Mio t SKE im Ausland beschafft werden kann, so verbleibt eine Deckungslücke von 8 Mio t SKE, die durch Kohleveredlungsprodukte zu schließen ist.

Der Bedarf an Dieselmkraftstoffen braucht im Jahre 2000 mit 17 Mio t SKE kaum höher zu sein als 1976 (16 Mio t SKE), wenn man davon ausgeht, daß erstens der Wirkungsgrad beim Dieselmotor verbessert wird und zweitens der durch die oben vorausgesetzte Erhöhung des Diesel-PKW-Bestandes entstehende Kraftstoff-Mehrbedarf durch Umstellung von Lastwagen und Bussen bei Post, Bahn und Kommunen sowie öffentlichen Verkehrsbetrieben auf Elektrobetrieb ausgeglichen wird.

Der hypothetische Bedarf an Leichtöl für die Raum- und Prozeßwärmeversorgung wird für das Jahr 2000 auf 90 Mio t SKE geschätzt gegenüber 72 Mio t SKE im Jahre 1976. Beim Wärmebedarf ist nämlich mit Auftriebendenzen zu rechnen, welche den durch rationellere Energienutzung erreichbar er-

scheinenden Minderverbrauch überkompensieren. Dies gilt u.a. für den Raumwärmebedarf der privaten Haushalte, auf die z. Zt. annähernd die Hälfte des gesamten Verbrauchs an leichtem Heizöl entfällt. Trotz rückläufiger Wohnbevölkerung wird voraussichtlich sowohl die Anzahl als auch die durchschnittliche Größe der Wohnungen in einem solchen Maße steigen, daß im Jahre 2000 eine um etwa 20 % größere Gesamtwohnfläche vorhanden sein wird. Zudem dürften die Komfortansprüche an die Raumklimatisierung steigen und zur Erhöhung des Heizenergiebedarfs beitragen. Der zukünftige Raumwärmebedarf in Handel, Handwerk, Kleingewerbe, Landwirtschaft und Staatsdienst (energiestatistisch unter "Kleinverbrauch" zusammengefaßt) hängt u.a. von der wirtschaftlichen Entwicklung und von der schwer abzuschätzenden Entwicklung der volkswirtschaftlichen Produktionsstruktur ab (Ausdehnung des tertiären Sektors). Auf jeden Fall ist hier wie im energiestatistischen Bereich "Haushalt" mit einer ähnlich hohen Zunahme der verbraucherbezogenen Bemessungsgrundlage der Wärmebedarfsschätzung zu rechnen, d.h. mit einer Vergrößerung der zu heizenden Fläche pro Person. Beim Prozeßwärmebedarf für Brauchwasserbereitung, Materialbehandlung etc. ist zum Teil mit noch stärkeren Auftriebstendenzen zu rechnen. Die Annahme eines gegenüber 1976 um 25 % höher angesetzten hypothetischen Leichtölbedarfs für die Raum- und Prozeßwärmeversorgung erscheint aufgrund der voraussehbaren Auftriebstendenzen als plausibel.

Unter Berücksichtigung des Bedarfs an Dieselkraftstoffen ergibt sich somit ein hypothetischer Gesamtbedarf an leichtem Heizöl von 107 t SKE und eine Versorgungslücke von 50 t SKE.

Geht man davon aus, daß in 20 Jahren kein Mineralöl mehr in Kraft- und Heizkraftwerken eingesetzt wird, so steht die gesamte Schweröl-Ausbeute von 35 Mio t SKE für die industrielle Prozeßwärme-Erzeugung zur Verfügung. Bei Annahme einer BSP-Wachstumsrate von 3 %/a bis zum Jahre 2000 ist unter Berücksichtigung neuerer Einsparschätzungen mit einem Bedarfszuwachs von etwa 60 % gegenüber 1976 zu rechnen. Im Jahre 2000 würden dann etwa 40 Mio t SKE an Schweröl zu Prozeßwärmezwecken benötigt, also nur 5 Mio t SKE mehr, als in unserer Projektion erzeugt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß bei einem projektierten Erdölbeitrag von 150 Mio t SKE zur Primärenergiebilanz des Jahres 2000, der in voller Höhe in den Raffinerien eingesetzt wird, in den Sektoren Industrie sowie Haushalt und Kleinverbrauch rein rechnerisch eine Versorgungslücke von 63 Mio t SKE an Ölprodukten entsteht:

- 8 Mio t SKE (PE) an Rohbenzin zur Gewinnung chemischer Grundsubstanzen (Olefine, Aromaten),
- 50 Mio t SKE (PE) an leichtem und 5 Mio t SKE (PE) an schwerem Heizöl zur Raum- und Prozeßwärmeversorgung.

#### Bedarf an Ölsubstitutionsenergien

Aufgrund dieses Defizits an Ölprodukten sowie aufgrund der postulierten Methanolbeimischung zum Benzin und der Teilelektrifizierung des privaten und öffentlichen Personen- und Güterverkehrs auf der Straße entsteht ein zusätzlicher Bedarf

- (a) an flüssigen und gasförmigen Sekundärenergieformen aus Kohle für energetische und nichtenergetische Zwecke,
- (b) an Elektrizität und Fernwärme auf der Basis von Kohle, Kernbrennstoff und Erdgas sowie an regenerativen Energien.

ad a): Sekundärenergieformen aus Kohle

Als Vergaserkraftstoff findet in unserer Projektion ein Gemisch aus 21 Mio t SKE Benzin und 2,4 Mio t SKE Methanol Verwendung. Zur Herstellung der eingeplanten 2,4 Mio t SKE Methanol aus Steinkohle (unter teilweiser Verwendung von Hochtemperaturreaktorwärme) sei eine Fahrweise des Lurgi-Prozesses gewählt, bei der etwa 2/3 der rd. 50 %-igen Ausbeute (in SKE) auf Gas und Öl entfallen. Der notwendige Einsatz beträgt dann ungefähr 16 Mio t SKE.



Zum Ausgleich der Rohbenzinfehlmenge von 8 Mio t SKE müssen zur Erzeugung von chemischen Grundsubstanzen auf dem Wege der direkten Kohlehydrierung bei ihrem heutigen Stand rd. 20 Mio t Steinkohle eingesetzt werden.

Die bei diesen Vergasungs- und Hydrierungsprozessen anfallenden Mengen an flüssigen und gasförmigen Kuppelprodukten reichen zum Ausgleich des Schwer- und Leichtöldefizits von 5 bzw. ungefähr 3 Mio t SKE bei der industriellen Prozeß- bzw. Raumwärme-Erzeugung aus. Somit enthält unsere Projektion einen Beitrag der Kohle zur Mineralöl-Substitution in Form von Kraftstoffen, Brennstoffen und Chemierohstoffen in Höhe von 36 Mio t SKE.

ad b): Regenerative Energiequellen und Fernwärme sowie Strom für Heiz- und Antriebszwecke

Das größte Substitutionsproblem entsteht beim Ausgleich der noch verbleibenden Versorgungslücke von 47 Mio t SKE beim Leichtöl. Hiervon entfallen 39 Mio t SKE auf die Raumwärmeversorgung im Sektor "Haushalt und Kleinverbrauch" und 8 Mio t SKE auf die Prozeßwärmeversorgung (Brauchwasserbereitung und Materialbehandlung) in den Sektoren "Haushalt und Kleinverbrauch" und "Industrie".

Es wird zunächst angenommen, daß bis zum Jahre 2000 8 Mio t SKE Leichtöl in der Raumwärmeerzeugung durch elektrische Wärmepumpen (4 Mio t SKE mittels 10 TWh aus 3 Mio t SKE Einsatz), durch Fernwärme (2 Mio t SKE) sowie durch Nutzung unkonventioneller Energiequellen (2 Mio t SKE) und 2 Mio t SKE Leichtöl bei der Brauchwassererwärmung durch Verwendung einfacher Sonnenkollektoranlagen eingespart werden können. Das noch verbleibende Leichtöldefizit von 37 Mio t SKE wäre durch elektrische Energie zu ersetzen. Davon entfallen noch 6 Mio t SKE auf die Brauchwasserbereitung und Materialbehandlung, die bei einem Gesamtnutzungsgradverhältnis von Ölverwendung zu Stromverwendung von ungefähr 0,60 zu 0,30 (mit Wärmerückgewinnung) durch 38 TWh Strom aus 12 Mio t SKE Kraftwerkseinsatz zu substituieren wären.

Von den restlichen 31 Mio t SKE (PE) Raumheizungsenergiebedarf entfallen bei einem Anteil des privaten Bereichs von 60 % rd. 19 Mio t SKE auf die Wohnraumheizung, der Rest auf die Heizung von gewerblichen Räumen etc..

Die im Haushaltsbereich zu ersetzenden 19 Mio t SKE entsprechen ungefähr dem Heizenergiebedarf von 5,4 Mio Wohnungen. Da diese Anzahl von Wohnungen den ab heute bis 2000 zu erwartenden Ersatzbedarf darstellt, wird hier der Anschaulichkeit wegen angenommen, daß die projektierte Substitution von 19 Mio t SKE (PE) Heizöl durch Einbau von elektrischen Heizsystemen in 5 bis 6 Mio Neuwohnungen erfolgt, welche ölbeheizte Wohnungen ersetzen. In diesem Fall hat man einerseits eine bis zu 20 % größere Wohnfläche anzusetzen, andererseits aber eine Bauweise zu unterstellen, bei welcher der von der DIN 4108 geforderte Mindestwärmeschutz teilweise um 60 % übertroffen wird. Diese beiden Faktoren sind bei der Quantifizierung der erforderlichen Substitutionsenergie zu berücksichtigen.

Wird z.B. eine ölbeheizte 80 m<sup>2</sup>-Wohnung eines Zweifamilienhauses aus den 30er Jahren durch eine elektrisch geheizte 96 m<sup>2</sup>-Neubauwohnung mit zweischaligem Mauerwerk und isolierverglasten Fenstern ersetzt, so werden in diesem Falle 11.130 kWh/a Heizstrom (ohne Brauchwasser) aus 4,4 t SKE Primärenergie gegenüber vorher 3450 l Heizöl aus 4,8 t SKE Primärenergie benötigt. Die Elektroheizung führt also in diesem Falle trotz 20 % größerer Wohnfläche zu einem Minderbedarf an Primärenergie von 8 %.

Die direkte oder indirekte Elektroheizung mittels Einzelgeräten (Speicher) oder Fußbodenheizung bietet in Verbindung mit erhöhtem Wärmeschutz von Gebäuden die Chance, den Verbrauch an leichtem Heizöl an das durch den Treibstoffbedarf des Verkehrs determinierte sinkende Niveau des Erdöleinsatzes anzupassen und die Primärenergiebilanz zu entlasten. Selbstverständlich fiele diese Entlastung stärker aus, wenn in den wärmegeschützten Neubauten weiterhin mit Öl (oder ersatzweise mit Erdgas) geheizt würde. Die Senkung des spezifischen Verbrauchs an Öl (oder Gas) zu Heizzwecken ist jedoch keine alternative Möglichkeit zur langfristigen

Sicherung der Energieversorgung, weil es ja in Anbetracht schwindender Ressourcen darauf ankommt, die Anzahl der von diesen Heizmaterialien abhängigen Verbraucher ständig zu verringern.

Die für den Realitätsgehalt der aufgezeigten Chance einer höheren Versorgungssicherheit durch Elektrifizierung der Raumheizung wesentliche Feststellung besteht nun darin, daß der Teil der Bevölkerung, der durch Übergang auf Elektroheizung für immer vom Öl als Heizenergie unabhängig geworden ist, tatsächlich bereits jetzt auch eine Entlastung unserer Primärenergiebilanz bewirkt: 1,7 Mio der z.Zt. existierenden 24 Mio Wohnungen werden elektrisch beheizt, und jede verbraucht lt. VDEW-Statistik pro Jahr rd. 9300 kWh. Ihr Nutzenergiebedarf (an den Raum abgegebene Wärme) liegt etwa 30 % unter dem Durchschnittsbedarf ölbeheizter Wohnungen. Der Hauptgrund dafür ist darin zu vermuten, daß die Wohnungseigentümer, die sich für die Elektroheizung entscheiden, die zur Zeit noch geringere Wirtschaftlichkeit der komfortableren Elektroheizung durch verstärkte Wärmeschutzmaßnahmen zu kompensieren versuchen. Der Übergang auf das in jeder Hinsicht angenehmere, in der Anschaffung billigere und im Falle der Fußbodenheizung auch physiologisch besonders empfehlenswerte Elektroheizsystem verringert den Grad der Ölabhängigkeit, ohne den Primärenergiebedarf zu steigern, erhöht also die passive Versorgungssicherheit. Da die Umwandlung einer bestimmten Menge Primärenergie in Raumwärme die Umwelt weniger belastet, wenn sie über Elektrizität aus Kohle, Kernbrennstoff, Öl, Gas und Wasserkraft anstatt über Heizöl erfolgt, wird auch die aktive Versorgungssicherheit verbessert.

Geht man von der nicht unrealistischen Annahme aus, daß in den nächsten 22 Jahren in über 5 Mio Wohnungen des Wohnungs-Ersatzbedarfs ölsubstituierende elektrische Wohnraumheizungen montiert werden, so bedeutet dies für unsere Projektion, daß die bei der Wohnraumheizung errechnete Leichtöl-Lücke von 19 Mio t SKE (PE) mit Strom aus einer (höchstens) gleich großen Menge an Primärenergieträgern geschlossen werden kann, d.h. mit (maximal) 60 TWh aus 19 Mio t SKE Kraftwerkseinsatz.

Zum Ausgleich des noch verbleibenden rechnerischen Leichtöldefizits von 12 Mio t SKE (PE) bei der Raumheizung in Handel, Gewerbe, Landwirtschaft etc. ist ein im Vergleich zur privaten Raumheizung relativ höherer Aufwand von 16 Mio t SKE Kraftwerkseinsatz zur Erzeugung von 50 TWh erforderlich.

Die Bewältigung des besonders schwierig erscheinenden Teilproblems der Erdöl-Substitution, nämlich der Ersetzung leichten Heizöls, erfolgt somit in unserer Projektion 2000 beispielhaft in der Weise, daß von den fehlenden 50 Mio t SKE Leichtöl 40 Mio t SKE <sup>+)</sup>  direkt (E-Heizung) oder indirekt (Wärmepumpen) durch 158 TWh Strom und 10 Mio t SKE durch Kohleveredlungsprodukte (3 Mio t SKE), Umweltenergien <sup>+)</sup>  (5 Mio t SKE) und Fernwärme (2 Mio t SKE) ersetzt werden.

Weiterer substitutiver Strombedarf besteht aufgrund der projektierten Teilelektrifizierung des Straßenverkehrs. Für ca. 2 Mio Elektro-PKW und -Kombiwagen sind bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von 12 600 km pro Jahr 12,6 TWh und somit rd. 4 Mio t SKE Kraftwerkseinsatz erforderlich. Hinzu kommen etwa 19 TWh aus 6 Mio t SKE Primärenergie zur Ladestromversorgung von etwa 0,3 Mio Elektro-Bussen, -LKW und -Transportern von Bundesbahn und Bundespost, von Verkehrsbetrieben, kommunalen Fuhrparks und dergleichen.

Die Substitutionsanalyse abschließend ist festzuhalten, daß im Jahre 2000 ein Erdölbeitrag zum Primärenergieaufkommen in Form eines am Motorenbenzinbedarf orientierten Raffinerie-Einsatzes von 150 Mio t SKE (Niveau 1976) ausreicht, wenn bis dahin Öl-Substitutionsprozesse in Gang gekommen sind, die jährlich folgende Energiemengen umsetzen:

- (a) 18, 4 Mio t SKE (PE) Chemie-Rohstoffe, Methanol sowie gasförmige und flüssige Brennstoffe (Kuppelprodukte) aus 36 Mio t SKE Veredlungskohle zum Ersatz der gleichen Menge an Ölprodukten.

---

<sup>+)</sup>  Bei der Substitution von 4 Mio t SKE Leichtöl durch Einsatz von Wärmepumpen werden 3 Mio t SKE dem Strom und 1 Mio t SKE den Umweltenergien zugerechnet.

(b) 190 TWh Heiz- und Antriebsstrom (E-Fahrzeuge) aus 60 Mio t SKE Kraftwerkseinsatz und Fernwärme und regenerative Energien entsprechend 2 bzw. 5 Mio t SKE (PE) zum Ersatz von 47 Mio t SKE (PE) an Ölprodukten.

Läßt man Fernwärme und regenerative Energien außer Betracht, so müssen zum Ersatz von insgesamt 65 Mio t SKE an Ölprodukten 96 Mio t SKE Primärenergie aufgebracht werden. Das energetische Aufwand/Ertrag-Verhältnis bei der projektierten Erdölsubstitution beträgt also ca. 1,5:1, d.h. zum Ersatz einer PE-Einheit Erdöl muß im Durchschnitt das 1,5-fache an Veredlungskohle und Primärenergie für Kraftwerke aufgewendet werden.

Bei der Substitution von Erdöl durch Kohleveredlungsprodukte beträgt das energetische Aufwand/Ertrag-Verhältnis 2:1, und dieses relativ ungünstige Verhältnis gilt für 27 % der zu ersetzenden Energiemenge. Der substitutive Strombedarf betrifft 73 % der Fehlmenge an Ölprodukten, und hier ist das Substitutionsverhältnis dank der extrapolierten Verbreitung der Wärmedämmung in privaten und gewerblichen Neubauten mit 60 zu 47 Mio t SKE oder 1,3:1 erheblich günstiger.

#### Kernenergiebeitrag zur Versorgungssicherheit 2000

Der Beitrag der Kernenergie zur Deckung des substitutiven Strombedarfs im Jahre 2000 und das Gesamtausmaß des Kernenergieeinsatzes im Rahmen unserer Projektion wird abschließend im wesentlichen davon abhängig gemacht, wieviel unser (passiv) versorgungssicherster Energieträger, nämlich die Steinkohle, zum vermutlichen Gesamtbedarf an Primärenergie im Jahre 2000 beitragen soll oder bestenfalls beitragen kann.

Unsere Referenzschätzung des Bedarfs an Primärenergieträgern (vgl. Tab. III-3) basiert auf dem PEV-Szenario der BMFT/Fichtner-Studie von 1977 /BMFT/FICHTNER (1977)/, das Energie-Einsparungen explizit berücksichtigt

Tabelle III-3: Projektion "Ölverbrauchsminimum 2000"

Primärenergieträgerverbrauch (PEV)  
(in Mio t SKE)

	Referenz	Projektion
Kohle	135 23 %	150 24 %
Öl	222 <sup>†</sup> ) 37 %	150 24 %
Gas	80 13 %	100 16 %
Uran	140 24 %	200 <sup>††</sup> ) 32 %
Sonstige	18 3 %	25 4 %
<b>Total</b>	<b>595 100 %</b>	<b>625 100 %</b>
Bruttosozialprodukt (Preisbasis 1962)	1260 Mrd DM	1260 Mrd DM <sup>†††</sup> )
Spezif. Energieverbrauch	472 kg/1000 DM	496 kg/1000 DM
Kraftwerksleistung (br.)	150 GW <sub>e</sub>	180 GW <sub>e</sub>
davon KKW-Leistung	66 GW <sub>e</sub>	95 GW <sub>e</sub> <sup>††††</sup> )
Stromerzeugung (br.)	770 TWh	960 TWh
davon KKW-Strom	420 TWh	610 TWh
Einsatz in Kraftwerken	246 Mio t SKE	306 Mio t SKE

†) Vorausgesetzte Treibstoff-Einsparung im Verkehr (9,2 Mio t SKE) berücksichtigt

††) Incl. nukleare Fernwärme und Fernenergie

†††) Die BSP-Wachstumsrate ab 1977 beträgt im Jahresdurchschnitt 3,1 %

††††) Excl. nukleare Fernwärme und Fernenergie

ohne die Kernenergienutzung überproportional zu reduzieren, das nicht auf "energiesparenden BSP-Wachstumsraten" beruht und das einen Substitutionsbereich für Steinkohle und Kernbrennstoffe aufweist. Der Gesamt-PEV der Projektion ist um den PE-Mehraufwand zur Ölsubstitution in Höhe von 30 Mio t SKE höher als der Referenz-PEV.

Wird der Bedarf an Veredlungskohle in Höhe von 36 Mio t SKE dem Referenz-Kohlebedarf hinzugerechnet, so erreicht die Kohle-Beanspruchung mit 171 Mio t SKE ein jenseits optimistischer Förderungs- und Einfuhrschätzungen liegendes Ausmaß. Geht man von einer langfristigen einheimischen Förderung von 100 Mio t Steinkohle und 35 Mio t SKE Braunkohle aus und addiert eine Steinkohlen-Einfuhr von 15 Mio t SKE, so erreicht der Kohle-Beitrag das u.E. maximale Niveau von 150 Mio t SKE. Um den Veredlungsbedarf zu decken, müssen also rd. 20 Mio t Steinkohle freigesetzt werden. Wir unterstellen, daß diese Menge bei der Wärmeversorgung im Industriebereich durch Erdgas ersetzt werden kann. Dessen projektiver Beitrag steigt somit von 80 auf 100 Mio t SKE - eine nach den neuesten Verlautbarungen einkalkulierbare Menge.

Der Beitrag der "Sonstigen Energieträger" erhöht sich in der Projektion um den oben veranschlagten substitutiven Bedarf an Fernwärme und Umweltenergie von 18 auf 25 Mio t SKE.

Somit ergibt sich für die Kernenergie eine zusätzliche Beanspruchung in Höhe des dem substitutiven Strombedarf entsprechenden Brennstoffeinsatzes von 60 Mio t SKE. Es wird dann eine installierte Kernkraftwerksleistung von 95 GW<sub>e</sub> erforderlich, mit der rd. 64 % des gesamten Stromverbrauchs erzeugt werden können.

Der projektive Anteil des Kraftwerkeinsatzes am Gesamt-PEV des Jahres 2000 beträgt 49 %, während er heute erst bei 30 % liegt. Mit dieser Zunahme des strombezogenen PEV-Anteils um 19 Punkte wird die angestrebte höhere Versorgungssicherheit in Form einer Verringerung des Ölbeitrags um etwa 50 Mio t SKE und des Öl-Anteils am PEV um 28 Punkte im Vergleich zu 1978 erreicht.

Die dargestellte Projektion 2000 soll eine Größenvorstellung der Aufgabe vermitteln, die von der Kernenergiewirtschaft unter diesen Aspekten quasi schon "am Vorabend des Nachölzeitalters" zu bewältigen sein wird.

#### Erhöhung der Stromversorgungssicherheit

Angesichts des im Rahmen der Projektion "Ölverbrauchsminimum 2000" quantifizierten Bedarfs an Strom zur Ölsubstitution einerseits und der Standort- und Genehmigungsproblematik bei Kraftwerken andererseits dürfte es für das störungsfreie Gelingen des Substitutionsprozesses darauf ankommen, den Zubaubedarf durch äußerst rationellen Einsatz der Kraftwerke zu minimieren.

Eine Rationalisierung des Kraftwerkseinsatzes ist in der Weise anzustreben, daß die Stromnachfrage im Zeitablauf ohne Komfort- und Produktionseinschränkungen möglichst weitgehend gleichmäßig wird.

Die zur Einsparung von Wärmekraftwerksleistung erwünschte Verstetigung der Stromproduktion kann mittels indirekter Speicherung von Schwachlastarbeit aus Grundlastkraftwerken für Zeiten des Spitzenbedarfs (Speicherkraftwerke) aus technischen und ökonomischen Gründen nicht entscheidend verbessert werden. Sie ist jedoch durch zeitliche Verschiebung der Nachfragedeckung erreichbar: Durch Schaltuhren und ferngesteuerte Schalter läßt sich eine Verlagerung der Benutzungszeit von Elektro-Großgeräten der Industrie (wärmetechnische Anlagen wie Glüh-, Schmelz- und Warmhalte-Öfen) und des Haushalts (Geschirrspüler, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Warmwasserbereiter) in die Schwachlastzeit, also in die Nachtstunden, erreichen. Das Umstellen der Schaltinstrumente kann z.B. mit Hilfe hochfrequenter Stromstöße über die normalen Netzanschlüsse erfolgen (Fernwirk- und Rundsteueranlagen) oder über Ultrakurzwellen. Zur Netzlastnivellierung kommt auch die Beschränkung der Netzbeanspruchung eines Kunden mit Hilfe von Regelsystemen in Frage, die bei Erreichen eines Grenzwertes bestimmte Stromkreise zeitweise abschalten, aber Lampen, Kühl- und Kochgeräte weiter unter Strom halten (Maximum- und Minimum-Regler, rechnergestützte Maximum-Überwachungsanlagen).

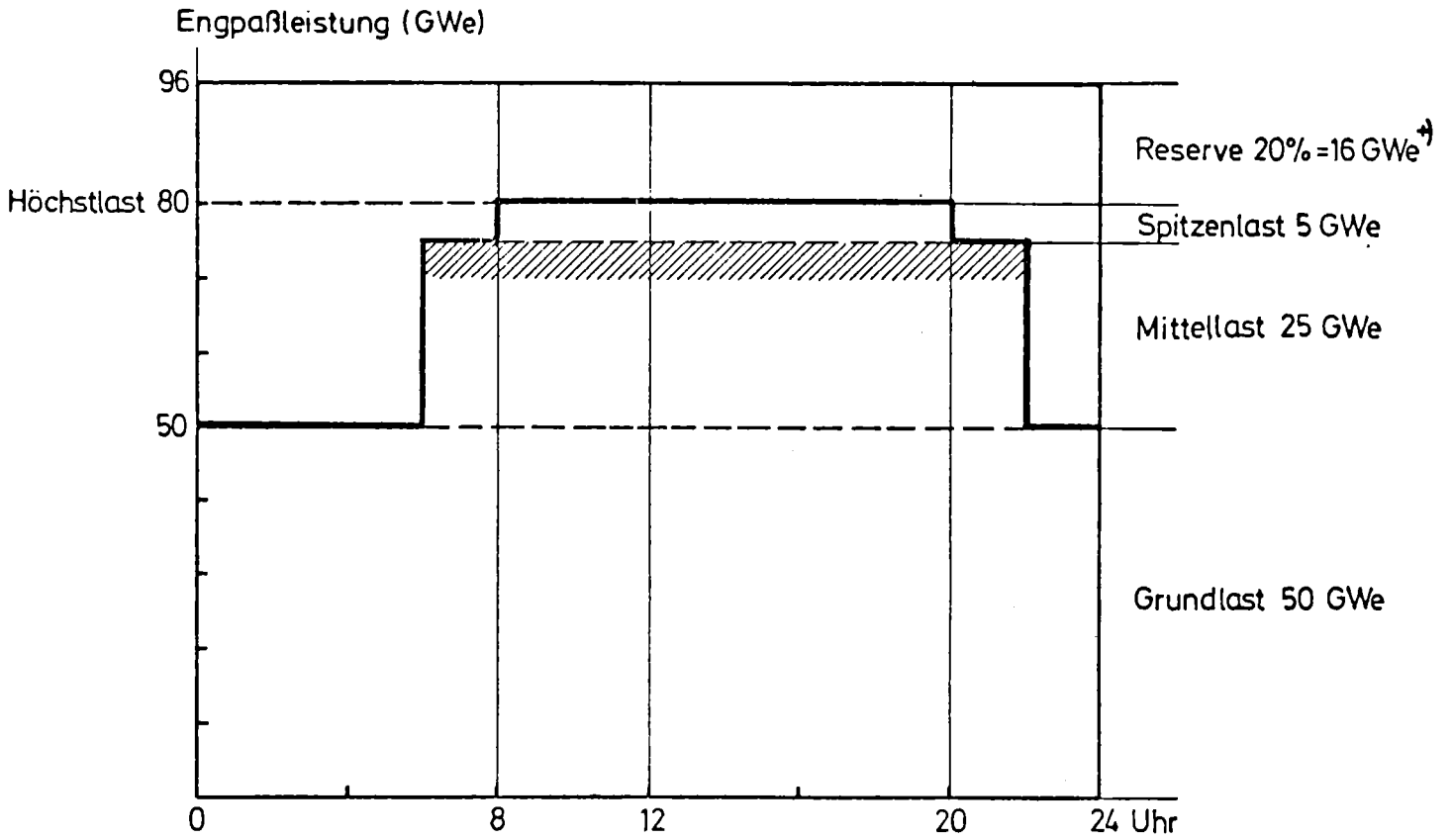


Mit der gesteuerten Stromnachfrage-Verschiebung wird eine Verkleinerung des Mittellastbereichs der Lastkurve zugunsten des energetisch und finanziell verteilhafteren Grundlastbereichs bezweckt: Anstatt kleine alte Blöcke an- und abzufahren, werden große moderne Blöcke zu bestimmten Tageszeiten mit höherer Leistung gefahren als bisher (intensitätsmäßige Anpassung). Außerdem kann in der Zubauplanung neue Kraftwerksleistung dadurch eingespart werden, daß man die einer bestimmten Anzahl von Neubauten im Mittellastbereich zugeordnete Arbeit einer geringeren Anzahl größerer Blöcke im Grundlastbereich überträgt (quantitative Anpassung).

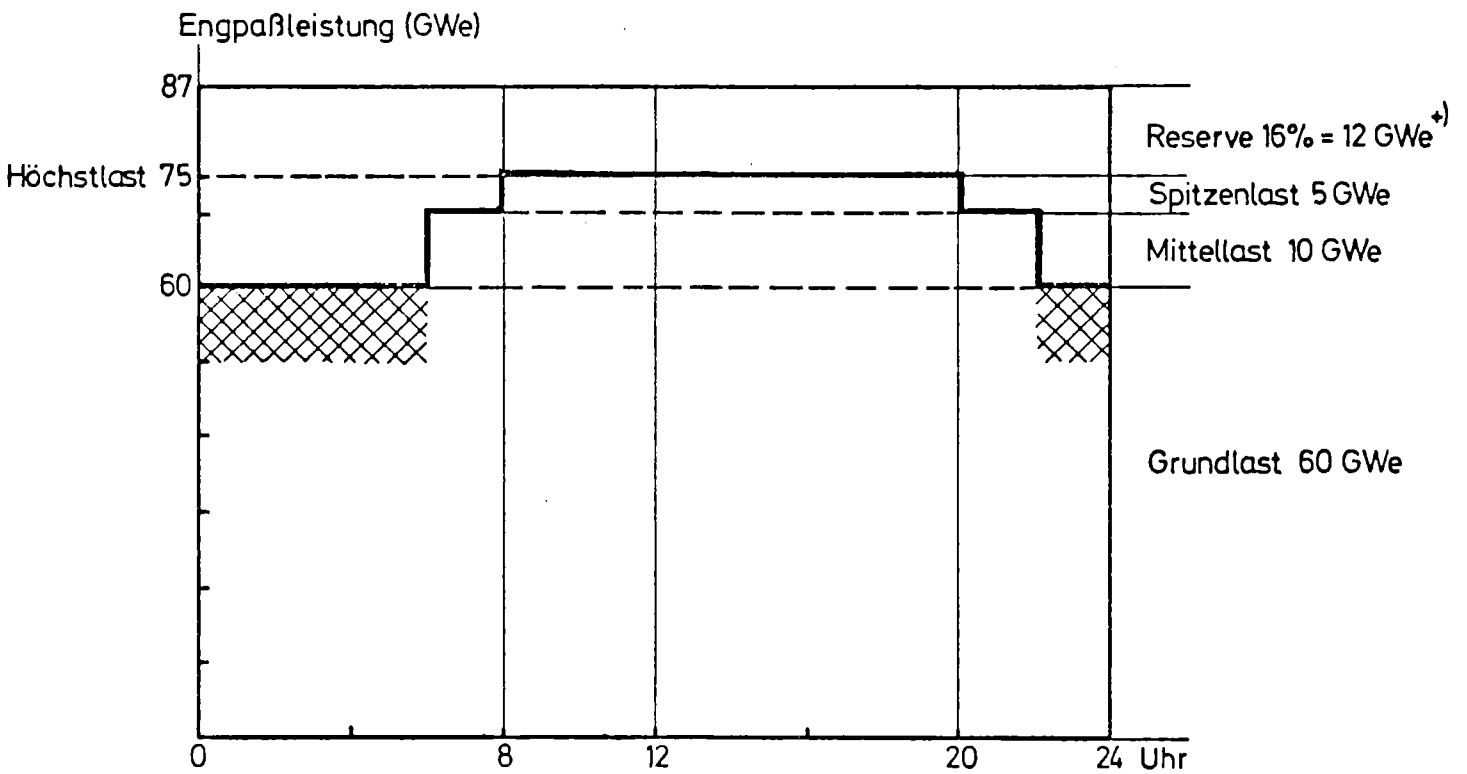
In der folgenden Abb. III-1 ist die durch gesteuerte zeitliche Verschiebung von Stromnachfrage aus dem Mittellast- in den Grundlastbereich anzustrebende Einsparung von Kraftwerksleistung im Prinzip dargestellt. Der Rationalisierungseffekt des Übergangs von Belastungsdiagramm A zu Diagramm B bei gleicher Stromerzeugung besteht nicht nur in der Verringerung des Mittellastbetriebs und der Einsparung an eingesetzter Leistung, sondern auch in der durch Höchstlastsenkung und höhere Kraftwerksverfügbarkeit möglich werdenden Verkleinerung der Leistungsreserve.

Der Lastunterschied im Tagesverlauf ist ein grober Anhaltspunkt für das durch Nachfrageverschiebung realisierbare Einsparpotential an partiell genutzter Kraftwerksleistung. Nimmt man an, daß sich die Nachtkleinstlast im Laufe der nächsten 20 Jahre auf 82 % erhöht und die Jahreshöchstlast im Jahre 2000 125  $\text{GW}_e$  beträgt, so würden am Tage der Jahreshöchstbelastung rd. 23  $\text{GW}_e$  nur tagsüber gebraucht und das (theoretische) Leistungseinsparpotential betrüge ungefähr 10  $\text{GW}_e$ .

Die von einer gesteuerten Nachfrageverschiebung ausgehende Verstärkung der Entwicklung zu modernen großen Leistungseinheiten wirkt sich mit zunehmender Betriebserfahrung und steigender durchschnittlicher Blockgröße des Kraftwerksparks im Laufe der Jahre in einer relativen Verringerung der (planmäßig oder außerplanmäßig) nicht betriebsbereiten Leistung aus. Deshalb kann in der Zubauplanung der durch die Erzeugungsbedingungen bestimmte Teil der Reserveleistung verringert werden. Aber auch die verbrauchsbestimmte Reservehaltung wird entlastet, wenn die Belastungskurve auf Grund der erwähnten verteilungstechnischen Maßnahmen gleichmäßiger verläuft.



Belastungsdiagramm A: Vor der Nachfrage-Verschiebung



Belastungsdiagramm B: Verringerte Mittellast durch Nachfrage-Verschiebung



Lastverlagerung von  (A) nach  (B) \*) in % der Höchstlast

Abb. III-1: Prinzip-Darstellung der leistungssparenden Last-Umverteilung durch gesteuerte Nachfrage-Verschiebung

Bei einem als akzeptabel erachteten Ausfallrisiko von 3 bis 4 % wird gegenwärtig eine Reserve von etwa 20 % der zu erwartenden Jahreshöchstbelastung des Netzes als erforderlich angesehen. Werden jedoch durch technisch-organisatorische Maßnahmen der geschilderten Art sowohl auf der Bedarfsseite (Belastungsnivellierung) als auch auf der Deckungsseite (höhere Block-Verfügbarkeit) die Parameter der Reservedimensionierung dauerhaft verändert, so würden möglicherweise 12 bis 15 % als Reservequote ausreichen, und die vorzuhaltende Leistung könnte im Jahre 2000 um weitere 6 bis 10 GW<sub>e</sub> verringert werden.

Leistungssparende Investitionen im Verbrauchsbereich können von der Elektrizitätswirtschaft allein weder durchgesetzt noch finanziert werden, und so erhebt sich die Frage nach ihrer Realisierbarkeit in Kooperation von Verbrauchern, Versorgern und Staat.

Die Ausdehnung des Grundlastbereichs bedeutet für die Erzeuger wirtschaftlicheren Kraftwerksbetrieb, der sich in einer tendenziellen Senkung der Erzeugungskosten auswirkt. Der zum Funktionieren des Konzepts unabdingbare finanzielle Anreiz für den Verbraucher zur Beteiligung an der schaltungstechnischen Investition könnte daher von den Versorgungsunternehmen in der Weise geboten werden, daß sie einen Teil ihrer "Grundlastprämie" über einen Sondertarif an die dem Steuerungssystem angeschlossenen Kunden weitergeben. Sache des Staates wäre es, die verbraucherseitigen Investitionen zur Gewährleistung der Stromversorgungssicherheit wie andere Energiesparmaßnahmen auch (z.B. im Wohnungsbau) zu bezuschussen.

Über die tatsächliche Beteiligung privater und kommerzieller Stromkunden können einstweilen nur Vermutungen angestellt werden. Zur Veranschaulichung der Realisierungschancen und der Organisation der gesteuerten Stromnachfrage-Verlagerung kann das folgende Ergebnis einer Modellrechnung dienen. Wenn die 2,4 Mio Haushalte, die heute in der Bundesrepublik mit Waschmaschine, Geschirrspüler und elektrischem Badewasserbereiter ausgestattet sind, diese Geräte nach einem bestimmten Benutzungsplan nur zwischen 22<sup>00</sup> und 1<sup>00</sup> Uhr in Betrieb nehmen würden, so könnten fossile Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von rd. 2,6 GW, entsprechend 4 großen Steinkohlenblöcken, aus dem unrationellen Mittellastbetrieb herausgenommen und nach Maßgabe des Leistungsbedarfszuwachses sukzessive für die Grundlast herangezogen werden.

### 3. Versorgungs- und Beschäftigungsprobleme des verzögerten Kernenergieeinsatzes

#### 3.1 Kernkraftwerksmangel und seine Problematik für die Stromversorgung

Zieht man zwischen den oben dargestellten wirtschafts- bzw. energiepolitisch bestimmten Projektionen und der gegenwärtigen Kernenergiezubaussituation Verbindungslinien, so ergeben sich gravierende Diskrepanzen zwischen der derzeitig erwartbaren und der wirtschafts- und energiepolitisch wünschenswerten Entwicklung des Kernenergieausbaus.

Auch wenn man einen Vergleich zur Energiebedarfsprognose 1985 zieht, die von den drei energiewissenschaftlichen Instituten erstellt und von der Bundesregierung zur Grundlage der 2. Fortschreibung des Energieprogramms gemacht wurde, ist bei einer nüchternen Beurteilung der gegenwärtigen Zubaussituation ein Kernenergieerzeugungs- und -leistungsdefizit im Jahre 1985 zu erwarten.

In dieser Prognose, die von einer Vorgabe eines durchschnittlichen Wirtschaftswachstums von 4 %/a im Zeitraum von 1975 bis 1985 ausgeht, wird angenommen, daß der Stromverbrauch im Prognosezeitraum 1975-1985 nicht mehr wie in den vorangegangenen 14 Jahren mit 7 %, sondern nur noch mit rd. 5,6 % im Jahresdurchschnitt wächst, so daß 1985 voraussichtlich 524 Mrd kWh gegenüber 302 Mrd kWh im Jahre 1975 im Inland erzeugt werden müssen. Dazu bedarf es einer Erhöhung der installierten Kraftwerksleistung von 74 GW<sub>e</sub> in 1975 auf 110 GW<sub>e</sub> bei gleichzeitiger Verbesserung der Kapazitäts- und der Brennstoffausnutzung um 17 % bzw. 2 %.

Bezüglich des Kernenergieeinsatzes nimmt man an, daß im Jahre 1985 eine installierte Kernkraftwerksleistung von 24 GW<sub>e</sub> ausreichen wird. Die

heute (Stand Juni 1978) arbeitenden Kernkraftwerke haben eine Gesamtleistung von 7,4  $\text{GW}_e$  (brutto). Es müßten also bis Ende 1985 weitere 14 Blöcke mit zusammen 16,6  $\text{GW}_e$  die Stromproduktion für die öffentliche Versorgung aufnehmen.

Wenn man die derzeitige Situation betrachtet, erscheint die Realisierung dieses Zubauprogramms kaum möglich zu sein.

Von den zwischen 1978 und 1985 in Betrieb zu nehmenden Werken mit insgesamt 16,6  $\text{GW}_e$  sind 2 Einheiten mit 2,2  $\text{GW}_e$  fertiggestellt, aber noch nicht am Netz (Philippsburg I, Unterweser). Voraussichtlich werden diese beiden Kernkraftwerke im Laufe des Jahres 1979 der öffentlichen Versorgung mit einer Verspätung von 5 Jahren zur Verfügung gestellt.

An 3 genehmigten Großkraftwerken mit zusammen rd. 4,2  $\text{GW}_e$  kann aufgrund von Gerichtsurteilen bis auf weiteres nicht gearbeitet werden (Wyhl, Brokdorf, Grohnde).

8 Kernkraftwerke mit zusammen 8,5  $\text{GW}_e$  sind genehmigt und befinden sich in einer mehr oder weniger fortgeschrittenen Bauphase. Den derzeitigen Planungen zufolge sollen sie zwischen 1980 und 1983 ans Netz gehen (Mülheim-Kärlich, Grafenrheinfeld, Krümmel, Uentrop, Kalkar, Gundremmingen B und C, Philippsburg II).

Zusätzlich müßten, um den Zubau von 16,6  $\text{GW}_e$  realisieren zu können, z.B. die zwei im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren befindlichen Projekte Biblis C (1300  $\text{MW}_e$ ) und Neckarwestheim II (800  $\text{MW}_e$ ) eine Baugenehmigung erhalten und bis 1985 fertiggestellt werden. Die Aussichten dafür sind allerdings in Anbetracht von mehreren Tausend Einsprüchen nicht als günstig zu bezeichnen. Auch bei den gerichtlich gestoppten Vorhaben Brokdorf und Wyhl (je 1400  $\text{MW}_e$ ) ist eine Fertigstellung bis 1985 stark in Zweifel zu ziehen. Wenn man annimmt, daß sich noch bei einem weiteren in früher Bauphase befindlichen Projekt, wie z.B. Philippsburg II (1400  $\text{MW}_e$ ), eine größere Verzögerung einstellt, so er-

gäbe sich gegenüber der 85er Soll-Leistung von 24 GW<sub>e</sub> ein Kapazitätsdefizit von etwa 6 GW<sub>e</sub>, das sich bei weiteren Verzögerungen bis 1990 auf 10 bis 15 GW<sub>e</sub> vergrößern könnte. Das Erzeugungsdefizit bei der Kernenergie würde 1985 bei Annahme von 6500 Vollaststunden/a 39 Mrd kWh betragen.

Bei der Diskussion von Möglichkeiten zur Schließung dieser Kernenergie-lücke ist zwischen dem Erzeugungs- und dem Leistungsproblem zu unterscheiden. Das Erzeugungsproblem könnte durch Mehreinsatz von Kohle, Öl und Gas in den vorhandenen und den bis 1985 gemäß Planung hinzukommenden fossilen Kraftwerken gelöst werden, wenn die Verstromungsbestimmungen entsprechend revidiert und Umweltbedenken zurückgestellt würden. Zur Erzeugung der Stromfehlmengende von 39 TWh müßten außer den bereits eingeplanten 104 Mio t SKE an Kohle, Öl und Gas zusätzlich 12 Mio t SKE verstromt werden. Bei einer Erhöhung der prognostizierten Ausnutzungsdauer bei Steinkohlekraftwerken von 4000 auf 4300 Stunden, bei Braunkohlekraftwerken von 6500 auf 7200 Stunden und bei Ölkraftwerken von 2700 auf 4000 Stunden und einem entsprechenden Mehreinsatz von 2,6 Mio t SKE Steinkohle, 3,6 Mio t SKE Braunkohle und 5,7 Mio t SKE Heizöl könnte dieses Erzeugungsdefizit rein rechnerisch ohne Erhöhung der vorgesehenen installierten Leistung fossiler Kraftwerke ausgeglichen werden.

Damit ist aber das Problem des Ausgleichs des Leistungsdefizits nicht gelöst; denn durch die zusätzliche Beanspruchung fossiler Kraftwerke zum Ausgleich der im Grundlastbereich fehlenden Kernkraftwerke entsteht ein Leistungsdefizit im Mittellastbereich. In Schwachlastzeiten wirft dies kein Problem auf; aber bei steigender Anforderung an den Mittellastbereich fehlen diese fossilen Kraftwerke dann im Mittellastbereich, und es droht der zum Netzzusammenbruch führende Leistungsmangel zur Zeit des Spitzenbedarfs.

Die in Erwägung gezogenen Möglichkeiten, ein Leistungsdefizit durch einen über die bisherige Planung hinausgehenden Zubau von Kohlekraft-

werke zu verhindern, sind angesichts der auch bei Kohlekraftwerken bestehenden Genehmigungsprobleme im Zusammenhang mit den Unsicherheiten bei der Anwendung der TA-Luft einerseits und der ökologischen Problematik der Weiterbetreibung stark umweltbelastender alter Kohlekraftwerke andererseits als unsicher bzw. fragwürdig zu bewerten. Selbst die Verwirklichung des bereits in die Versorgung "eingeplanten" 10 GW<sub>e</sub>-Neubauprogramms von Steinkohlekraftwerken bis 1985 muß angesichts der Genehmigungsschwierigkeiten als ungewiß angesehen werden, so daß ein darüber hinausgehender Zubau von Steinkohlekraftwerken zum Ausgleich der fehlenden Kernkraftwerksleistung als kaum realistische Lösungsmöglichkeit auszuschließen ist. Auf die ökologische Problematik einer Weiterbetreibung veralteter Steinkohlekraftwerke sei hier nur mit dem Hinweis aufmerksam gemacht, daß diese Kraftwerke viermal soviel Schwefeldioxyd emittieren wie die zur Zeit umstrittenen neuen Kohlekraftwerke, nämlich 11 kg SO<sub>2</sub>/h pro MW.

Wenn man diese Lösungsmöglichkeiten deshalb ausschließt, so verbleiben als Notmaßnahmen zur Schließung einer Leistungslücke zwei Wege:

- (1) Auf der Erzeugerseite die Inanspruchnahme von Leistungsreserven für die planmäßige Versorgung und
- (2) auf der Verbraucherseite der Verzicht auf Stromnachfrage zu kritischen Tageszeiten.

ad (1) Im Zeitraum 1969-1976 hat die am Tage der Jahreshöchstlast nicht eingesetzte Kraftwerksleistung wesentlich stärker zugenommen als die Engpaßleistung. Der nicht eingesetzte Teil der Engpaßleistung der öffentlichen Kraftwerke stieg von 20 % auf 34 % und lag in zunehmendem Maße über der für erforderlich gehaltenen Leistungsreserve von 20 % der Jahreshöchstlast. Diese verstärkte Reservebildung könnte Maßnahme (1) als z. Zt. gerechtfertigt bzw. im Hinblick auf die Versorgungssicherheit als vertretbar erscheinen lassen. Es ist aber darauf hinzuweisen, daß

die Zubauplanung der Elektrizitätswirtschaft bis 1985 mit einem durchschnittlichen Wachstum der Engpaßleistung von unter 4 % bei einem erwarteten durchschnittlichen Stromverbrauchswachstum von knapp 6 % für den Zeitraum bis 1985 so dimensioniert ist, daß die zur Zeit vorhandene freie Leistung, d.h. die über die erforderliche Reserveleistung hinausgehende Reserve, bis 1985 abgebaut wird. In der Perspektive für 1985 ist deshalb Maßnahme (1) keineswegs als risikolos im Hinblick auf die Versorgungssicherheit zu betrachten.

ad (2) Das Risiko reduzierter Leistungsreservehaltung zur Entlastung des Kraftwerk-Zubaus verringert sich in dem Maße, wie die Verbraucher bereit sind, bei Annäherung an die Maximalbelastung des Netzes auf Stromnachfrage zu verzichten. Dieser Verzicht muß von den Erzeugern aus betrachtet mit einer gewissen Zuverlässigkeit erfolgen und darf nicht rein fakultativ sein. Stunden oder Tage vor der drohenden Netzüberbelastung erfolgende Aufforderungen oder Appelle an die privaten Verbraucher, stromintensive Geräte nicht einzuschalten, dürften eine nennenswerte Wirkung nur in Verbindung mit Abschalt-Androhungen haben.

Erfolgversprechender wäre es, die Verbraucher für den Anschluß an Systeme der Abschaltung oder des Einschaltstops bestimmter Gerätegruppen zu festgesetzten oder kurzfristig angesagten Tageszeiten zu gewinnen (Rundsteuerung). Zu erwägen ist auch die selektive Abschaltung von Verbrauchergruppen.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß man bis 1985 das durch die zu erwartende Kernenergielücke entstandene Leistungsproblem mit Hilfe der obengenannten Maßnahmen (1) und (2) voraussichtlich "notdürftig" lösen könnte. Es ist jedoch offensichtlich, daß in einer längerfristigen Perspektive bei sich vergrößerndem Leistungsdefizit solche Maßnahmen nicht mehr ausreichen. Sollten die Verzögerungen im Kernenergieausbau und die Genehmigungsprobleme bei Steinkohlekraftwerken anhalten, so ist aber eine Vergrößerung des Leistungsdefizits nach 1985 nicht auszuschließen.



### 3.2 Beschäftigungspolitische Effekte eines verzögerten Kernenergieausbaus

Im Zusammenhang mit den Verzögerungen im Kernenergieausbau sind auch die beschäftigungspolitischen Folgen einer solchen Entwicklung thematisiert worden. Unterschieden werden können beschäftigungspolitische Folgen durch Ausfall oder Verzögerungen von Kernkraftwerksinvestitionen einerseits und beschäftigungspolitische Effekte im Falle von Stromversorgungsschwierigkeiten andererseits.

Bei der Analyse der Beschäftigungseffekte durch Ausfall oder Verzögerungen von Kernkraftwerksinvestitionen wird von einer Untersuchung des DIW ausgegangen, die zu dem Ergebnis kommt, daß durch den Bau eines Kernkraftwerks von 1300 MW Leistung insgesamt 39 000 Mannjahre gebunden werden /DIW (1976a)/. Hierbei sind neben den produktionsbedingten Beschäftigungseffekten in Höhe von ca. 25 000 Mannjahren, die durch die Erstellung eines Kernkraftwerks bei der Kraftwerksindustrie und ihren Zulieferern entstehen, auch die sog. Multiplikatoreffekte (in Höhe von 14 000 Mannjahren) berücksichtigt, d.h. die Beschäftigungseffekte, die sich aus der konsumtiven Verwendung der aus dem Bau eines Kernkraftwerks resultierenden zusätzlichen Einkommen der privaten Haushalte ergeben.

Unter Zugrundelegung dieses Ergebnisses werden für drei Kernenergieausbauszenarien die Beschäftigungseffekte analysiert. Das Referenz-Szenario sieht einen Ausbau der Kernkraftwerkskapazität auf 24 GW<sub>e</sub> bis 1985 und auf 40 GW<sub>e</sub> bis 1990 vor, wie es von den energiewissenschaftlichen Instituten für erforderlich gehalten wird. Diesem Referenz-Szenario werden zwei Alternativ-Szenarien gegenübergestellt, die davon ausgehen, daß weitere Baugenehmigungen für Kernkraftwerke erst nach Vorliegen einer rechtskräftigen 1. Teilerrichtungsgenehmigung für das Entsorgungszentrum erteilt werden: Im Alternativ-Szenario I wird dies für 1980 und im Alternativ-Szenario II für 1982 angenommen; neue Baugenehmigungen würden demnach erst 1981 (Alternativ-Szenario I) bzw. 1983 (Alternativ-Szenario II) erteilt.

Für beide Alternativ-Szenarien wurden weiterhin folgende Annahmen getroffen: An den zur Zeit gerichtlich gestoppten Projekten Wyhl, Brokdorf und Grohnde wird vorerst nicht mit dem Bau begonnen bzw. weitergebaut; nach Beendigung des Genehmigungsstops wird verstärkt ausgebaut, um die eingetretenen Verzögerungen aufzuholen.

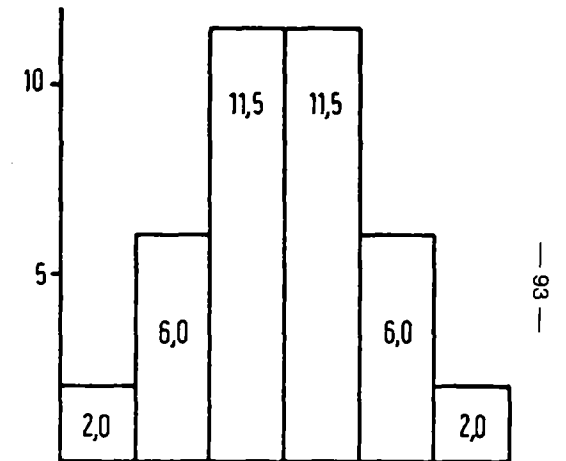
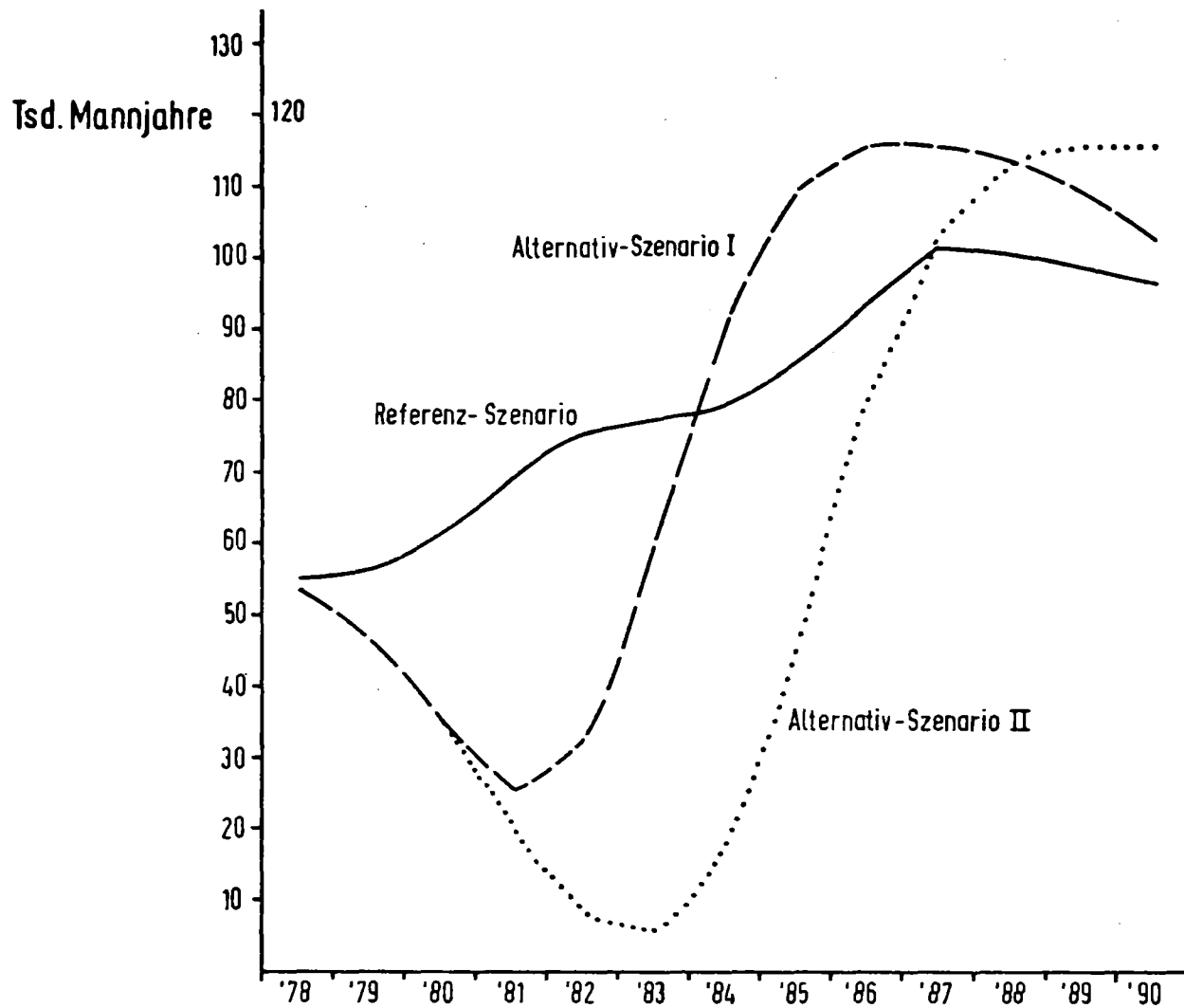
Aus Abb. III-2 ersieht man, daß bei einem Ausbau gemäß dem Referenz-Szenario langfristig im Durchschnitt jährlich knapp 100 000 Mannjahre gebunden würden. Bei Verzögerungen im Kernenergie-Ausbau, wie sie in den Alternativ-Szenarien I und II angenommen werden, könnten sich, wie aus Abb. III-2 abzulesen ist, in der ersten Hälfte der 80er Jahre Beschäftigungsausfälle von etwa 25 000 bis etwa 70 000 Mannjahren pro Jahr gegenüber einem störungsfreien Ausbau ergeben.

Insbesondere Verzögerungen, wie sie im zweiten Alternativ-Szenario angenommen werden, könnten die Existenz der kerntechnischen Industrie und der dort Beschäftigten gefährden. Rein rechnerisch würde die aus der Inlandsnachfrage resultierende Beschäftigung in der kerntechnischen Industrie in den Jahren 1982 und 1983 auf unter 1000 Mannjahre pro Jahr sinken, wie aus Abb. III-3 hervorgeht, in der nur der Beschäftigungseffekt im Kernkraftwerksbau, d.h. bei den unmittelbaren Lieferanten, dargestellt wird<sup>+</sup>). Wenn bei einer solchen Entwicklung nicht ein Ausgleich durch Ausweitung der Exporte erreicht werden kann, ist nicht anzunehmen, daß die betroffenen Unternehmen ihr hochqualifiziertes Personal halten können. Dies wäre gleichbedeutend mit einem schweren know-how-Verlust für diese Unternehmen und der Einbuße ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit.

Nicht diese strukturellen Beschäftigungseffekte, wohl aber die globalen Beschäftigungseffekte könnten prinzipiell ausgeglichen werden, wenn man

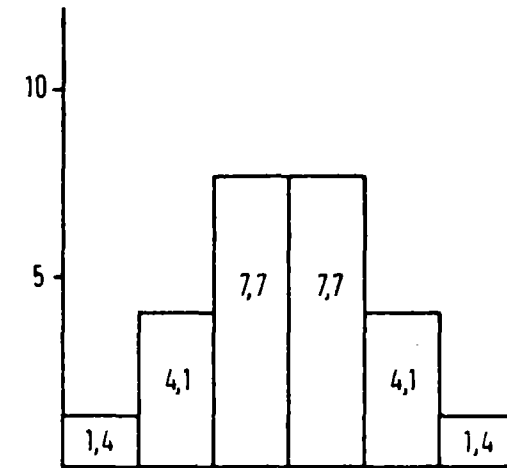
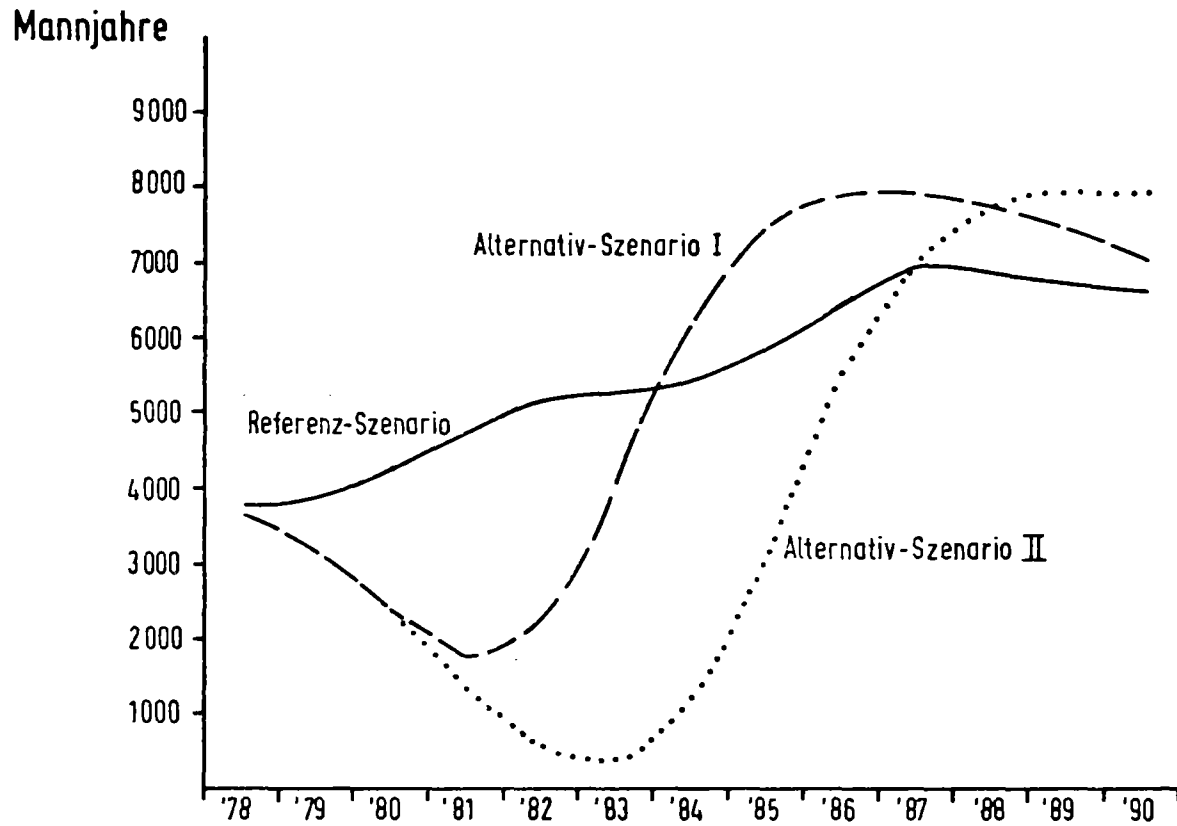
---

<sup>+</sup>) Der Beschäftigungseffekt durch den Bau eines Kernkraftwerkes im Sektor "Kernkraftwerksbau" beträgt nach Berechnungen des DIW circa 2600 Mannjahre /DIW (1976a)/



Annahme über die zeitliche Verteilung des Beschäftigungseffekts des Baus eines KKW auf den sechsjährigen Bauzeitraum/ Tsd. Mannjahre

Abb. III-2: Beschäftigungseffekte verschiedener Kernenergie-Ausbauszenarien (einschließlich Multiplikatoreffekte)



Annahme über die zeitliche Verteilung des Beschäftigungseffekts des Baus eines KKW auf den sechsjährigen Bauzeitraum/100 Mannjahre

Abb. III-3: Beschäftigungseffekte verschiedener Kernenergie-Ausbauszenarien im Sektor "Kernkraftwerksbau"

die Verzögerungen im Kernkraftwerksbau durch den Bau von Kohlekraftwerken kompensieren würde, da beim Bau von Kohlekraftwerken mit einer Leistung eines Kernkraftwerks von 1300 MW entsprechenden Leistung ein ähnlich hoher Beschäftigungseffekt entsteht (ca. 38 000 Mannjahre nach Berechnungen des DIW /DIW (1976 b)/. Allerdings dürfte sich dadurch zunächst an der derzeit unbefriedigenden Beschäftigungslage im Kraftwerksbau wenig ändern, da die Vorlaufzeiten für Planung und Genehmigung der zusätzlichen Kohlekraftwerke zu berücksichtigen sind. Außerdem erscheint ein vollständiger Ausgleich des Ausfalls von Kernenergieleistung durch den Bau zusätzlicher Kohlekraftwerke zumindest kurz- und mittelfristig schon deswegen unwahrscheinlich, weil die Elektrizitätswirtschaft hinsichtlich des Zubaus von Kohlekraftwerken wegen der wirtschaftlichen Vorteile der Kernenergie zunächst sehr vorsichtig disponieren dürfte und wahrscheinlich versuchen würde, das Kapazitätsproblem durch Verschiebung von Stilllegungen zu entschärfen. Im Gegensatz zu den oben aufgezeigten strukturellen Beschäftigungsproblemen bei Verzögerungen im Kernkraftwerksbau handelt es sich hier aber um ein temporäres Problem, da davon auszugehen ist, daß diese Verzögerungen entweder nach Lösung der Genehmigungsprobleme durch forcierten Ausbau der Kernenergie oder aber bei anhaltenden Genehmigungsschwierigkeiten durch Investitionen in anderen Kraftwerkstechnologien ausgeglichen und damit auch die Beschäftigungsausfälle per Saldo kompensiert werden dürften.

Im Zusammenhang mit den Verzögerungen im Kernenergie-Ausbau ist vielfach auf die schwerwiegenden ökonomischen, insbesondere beschäftigungspolitischen Folgen einer unzureichenden Stromversorgung hingewiesen worden. Stromversorgungsschwierigkeiten führen unmittelbar zu Störungen der Produktions- und Wirtschaftsabläufe, da Strom bei gegebener technischer Ausstattung im Produktions- und Haushaltssektor kurzfristig kaum zu substituieren ist. Aufgrund der psychologischen Wirkung von Stromversorgungsschwierigkeiten auf Investitionsneigung und Konsumverhalten dürften die Produktions- und Beschäftigungsausfälle noch weit höher sein, als die Verknappung des

Stroms eigentlich erfordern würde. Ob durch selektive Rationierungsmaßnahmen bei größeren Stromversorgungsschwierigkeiten die volkswirtschaftlichen Schäden in spürbarem Maße vermindert werden können, ist sehr fraglich, da bei einem selektiven Vorgehen, z.B. durch Rationierung des Strombezugs für stromintensive Industriezweige, aufgrund der starken interindustriellen Verflechtungen auch die Zuliefer- und Abnehmerindustrien betroffen wären und so starke Ungleichgewichte hervorgerufen würden.

Um das Ausmaß der beschäftigungspolitischen Folgen größerer Stromversorgungsschwierigkeiten zu demonstrieren, wurden von verschiedenen Stellen Gutachten über mögliche Auswirkungen einer "Stromlücke" erstellt. Für sehr pessimistische Annahmen über die weitere Entwicklung des Kernenergieausbaus ( /DIW (August 1977)/: Beendigung des Ausbaus der Kernenergie bei 6450 MW installierter Leistung im Jahre 1976; /Deutsches Atomforum (August 1977)/: zehnjähriges Moratorium) wurden gesamtwirtschaftliche Beschäftigungsausfälle von mehreren Millionen zusätzlicher Arbeitsloser berechnet (DIW: 2,9 Mio. im Jahre 1990; Deutsche Atomforum: bis zu 8 Mio. im Jahre 1995). Zu solchen Berechnungen ist anzumerken, daß weder Anpassungsreaktionen der Stromverbraucher auf sich abzeichnende Stromversorgungsschwierigkeiten noch Möglichkeiten der Stromerzeuger, auf andere Stromerzeugungstechnologien auszuweichen, berücksichtigt werden. Generell erscheint uns eine quantitative Erfassung der beschäftigungspolitischen Folgen von Stromversorgungsschwierigkeiten wegen der zahlreichen Unwägbarkeiten - insbesondere in bezug auf die Verhaltensweisen von Unternehmen und Verbrauchern - auch als sehr problematisch bzw. weitgehend spekulativ.

Als Fazit ist festzuhalten, daß Stromversorgungsschwierigkeiten wegen ihrer beträchtlichen, kaum übersehbaren volkswirtschaftlichen Folgen auf jeden Fall vermieden werden müssen. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, daß sich, anders als z.B. beim Öl-Boykott durch die arabischen Staaten im Jahre 1973, etwaige Stromversorgungsschwierigkeiten relativ frühzeitig abzeichnen dürften und deshalb auch

noch ein gewisser zeitlicher Spielraum für gegensteuernde Maßnahmen gegeben sein würde. Größere Stromversorgungsschwierigkeiten dürften 3 bis 5 Jahre im voraus mit relativ großer Sicherheit voraussehbar sein, da für einen solchen Zeitraum sowohl die Stromverbrauchsentwicklung als auch die Kraftwerkskapazitätsentwicklung in etwa überschaubar sind. Bei einem solchen zeitlichen Spielraum könnten im Notfall u.a. durch Verschiebung von Stilllegungen und möglicherweise auch durch Neubau von Spitzenlastkraftwerken, deren Planungs- und Bauzeit geringer ist als bei Grundlastkraftwerken, Stromversorgungsschwierigkeiten zunächst überbrückt werden, bis eine langfristige, durchsetzbare energiewirtschaftliche Lösung für die Stromversorgung gefunden ist.

#### 4. Wirtschaftlichkeit von Kernkraftwerken

Die Kernenergie wird in der nächsten Zukunft nur zur Stromerzeugung genutzt werden. Die Kosten der Kernenergienutzung werden sich daher in den Stromkosten niederschlagen. Lange Zeit war dabei unbestritten, daß die Kernenergie aufgrund ihrer niedrigen Stromgestehungskosten im Grundlastbereich einen Beitrag zur Stabilisierung der Strompreise leisten würde. Neuerdings werden dagegen auch Zweifel an der überlegenen Wirtschaftlichkeit der Kernenergie im Vergleich zur Stromerzeugung auf Basis von Steinkohle angemeldet. Als Hauptargumente werden dabei angeführt:

- der starke Anstieg der Investitionskosten bei Kernkraftwerken,
- die Preissteigerungen für Natururan und Trennarbeit,
- die noch nicht genau abschätzbaren Kosten für Wiederaufarbeitung und Endlagerung,
- die ungesicherten Verfügbarkeiten der Kernkraftwerke.

Eine vergleichende Analyse von 11 neueren Gutachten ergibt aber, daß die Stromerzeugungskosten (jeweils berechnet für das erste Betriebsjahr nach dem sogenannten Annuitätenverfahren) unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten bei Kernkraftwerken weiterhin deutlich niedriger liegen als bei Steinkohlekraftwerken. Der Kostenvorteil liegt im Durchschnitt aller ausgewerteten Gutachten bei 3 Dpf/kWh, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß er von Studie zu Studie in Abhängigkeit insbesondere von Annahmen über die Investitionskosten pro Kraftwerk und die Inflationsrate sehr unterschiedlich ausfällt (niedrigster Wert 1,2, höchster Wert 5,2 Dpf/kWh). Für ein konkretes Kraftwerksprojekt können zudem weitere, hier nicht berücksichtigte Kostenfaktoren (z.B. standortspezifische Faktoren) die Kostendifferenz größer oder geringer werden lassen. Annahmen und Ergebnisse der drei neuesten Gutachten sind in der Tabelle III-4 dargestellt.

In den Gutachten von Bohn /BOHN, T., u.a. (1977)/ und /Schmitt, D., u.a. (1977)/ werden auch Berechnungen der Stromerzeugungskosten für die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerkes nach dem sog. Barwertverfahren durchgeführt. Diese Berechnungen weisen die Stromerzeugung bei Kernkraftwerken als besonders kostengünstig aus (vg. Tabelle III-5). Es wird allerdings vorausgesetzt, daß die Kapitalkosten, deren Anteil an den Erzeugungskosten bei Kernkraftwerken mit ca. 60 bis 70 % (vgl. Tabelle III-4) wesentlich höher ist als bei Kohlekraftwerken, während der Lebensdauer des Kraftwerks konstant bleiben. Diese Annahme erscheint gerechtfertigt, da die Kapitaldienste nur geringen Schwankungen unterliegen und bei ihnen nicht mit ständigen Erhöhungen wie bei den Brennstoff- und sonstigen Betriebskosten gerechnet werden muß.

Angesichts der Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung einzelner Kostenfaktoren wurden Analysen über den Einfluß von Variationen einzelner Kostenfaktoren auf die Stromerzeugungskosten durchgeführt. Als Vergleichszeitpunkt wurde der Beginn des Kraftwerkbaus gewählt. Aufgrund der verschiedenen Kostenstrukturen bei Kohle- und



Tabelle III-4: Neueste Gutachten über Stromgestehungskosten

- 1) Preisniveau Frühjahr 1977
- 2) bei 4 % Inflation
- 3) bei 6 % Inflation
- 4) Spotpreis für sofortige Lieferung
- 5) Auslastung: 7000 h/a

Kernkraftwerke				Kohlekraftwerke			
Gutachten	Michaelis <sup>+</sup> )	Bohn u.a. <sup>++)</sup>	Schmitt u.a. <sup>+++)</sup>	Gutachten	Michaelis <sup>+</sup> )	Bohn u.a. <sup>++)</sup>	Schmitt u.a. <sup>+++)</sup>
Jahr der Inbetriebnahme	1983	1985	1985	Jahr der Inbetriebnahme	1981	1985	1985
Uranpreis / $\$/lb U_3O_8$ /	40 <sup>1)4)</sup>	30 <sup>1)</sup>	27 <sup>1)</sup>	Kohlepreis /DM/to/	149 <sup>1)</sup>	155 <sup>1)</sup>	155 <sup>1)</sup>
Trennarbeit / $\$/UTA$ /	110 <sup>1)</sup>	250 <sup>DM</sup> UTA	100 <sup>1)</sup>				
Brennelementherstellung /DM/kg Uran/	360 <sup>1)</sup>	350 <sup>1)</sup>	340 <sup>1)</sup>				
Wiederaufarbeitung u. Endlagerung /DM/kg Uran/	250 <sup>1)</sup>	900 <sup>1)</sup>	900 <sup>1)</sup>				
Investitionskosten /DM/kWe/	1634 <sup>1)</sup>	1595 <sup>1)</sup>	1635 <sup>1)</sup>	Investitionskosten /DM/kWe/	1050 <sup>1)</sup>	1157 <sup>1)</sup>	1200 <sup>1)</sup>
Stromerzeugungskosten /Dpf/kWh/ <sup>5)</sup>	9,4	9,27 <sup>2)</sup> 10,74 <sup>3)</sup>	9,32	Stromerzeugungskosten /Dpf/kWh/ <sup>5)</sup>	13,1	12,94 <sup>2)</sup> 15,65 <sup>3)</sup>	11,87
Anteil der Kapitalkosten an den Stromerzeugungskosten /%/	59	60,5 <sup>2)</sup>	63,5 <sup>3)</sup> 57,5 <sup>3)</sup>	Anteil der Brennstoffkosten an den Stromerzeugungskosten	60,2	59,7 <sup>2)</sup> 62,5 <sup>3)</sup>	62,4
Verhältnis Investitionskosten Kohle-/Kernkraftwerk /%/	64,3 <sup>1)</sup>	72,5 <sup>1)</sup>	73 <sup>1)</sup>	Verhältnis Stromerzeugungskosten Kohle-/Kernkraftwerk	1,39	1,39 <sup>2)</sup> 1,46 <sup>3)</sup>	1,27

Quellen: siehe Fußnoten auf Seite 100

Tabelle III-5: Stromerzeugungskosten nach dem Barwertverfahren  
(Auslastung: 7000 h/a)

Gutachten	Bohn u.a.++)		Schmitt u.a.+++)	
	LWR	Kohle- kraftwerk	LWR	Kohle- kraftwerk
Lebensdauer (in Jahren)	25	25	20	20
Barwert der Stromerzeugung- kosten (Dpf/kWh)	9,7	17,9	10,74	16,42

Quellen: siehe Fußnoten ++) und +++)

Anmerkung: Die einzelnen Angaben sind nicht ohne weiteres vergleichbar, da unterschiedliche Bezugspunkte (1980 und 1985) und unterschiedliche Annahmen über die Inflationsentwicklung zugrundegelegt wurden.

+) H. Michaelis, Ist Kernenergie wirtschaftlich?  
Aktuelle Themen, Kerntechnische Gesellschaft, KAT-3-77

++) T. Bohn, P. Eich, U. Hansen, B. Jehle, Künftige Stromerzeugungskosten von Großkraftwerken in der BRD, Jül-Spez-2, November 1977, ISSN 0B43-7639

+++) D. Schmitt, H. Jungk, K.F. Ebersbach, H. Prechtl, Parameterstudie zur Ermittlung der Stromerzeugungskosten, Wirtschaftswissenschaftliches Institut an der Universität Köln, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, September 1977

Kernkraftwerken wirken sich Variationen einzelner Kostenfaktoren unterschiedlich auf die jeweiligen Stromgestehungskosten aus. Die Stromerzeugungskosten bei Kernkraftwerken sind besonders empfindlich gegenüber Variationen von Kostenparametern, die die Kapitalkosten tangieren, da die Kapitalkosten bei Kernkraftwerken einen Anteil von rd. 60 % an den Stromerzeugungskosten haben. Eine Erhöhung der Anlagekosten von z.B. 10 % führt bei Kernkraftwerken zu einer Erhöhung der Stromgestehungskosten von 6 %, bei Kohlekraftwerken aber nur zu einer Erhöhung von 3,5 %. Auch gegenüber Bauzeitverlängerungen, wie sie zur Zeit durch die Verzögerung bei Kernkraftwerken auftreten, sind die Stromgestehungskosten bei Kernkraftwerken empfindlich, da dadurch die Kapitalkosten erhöht werden. Andererseits würde eine Erhöhung des Uranpreises um 10 % die Kernstromkosten nur um knapp 4 % erhöhen. Auch gegenüber anderen Kostenfaktoren des Brennstoffkreislaufes, z.B. für Wiederaufarbeitung und Entsorgung, sind die Stromgestehungskosten bei Kernkraftwerken relativ unempfindlich. Geht man, wie in den neueren Gutachten, von Kosten von 900 DM/kg Uran für Wiederaufarbeitung und Entsorgung aus, so würde eine 50 %-ige Kostensteigerung nur zu einer Erhöhung der Kernstromkosten von 0,17 Dpf/kWh führen. Bei Kohlekraftwerken werden die Erzeugungskosten dagegen relativ stark durch Kohlepreiserhöhungen tangiert, da der Anteil der Brennstoffkosten an den Kohlestromkosten rd. 60 % beträgt.

Wenn man nun unterstellt, daß in absehbarer Zeit keine Entwicklungen bei den einzelnen Kostenfaktoren eintreten, die das Verhältnis Kernstrom- / Kohlestromkosten entscheidend verändern würden, so erhebt sich die Frage, welche direkten Mehrbelastungen sich für die Volkswirtschaft ergäben, wenn die Kernenergieausbauplanungen nicht in vorgesehenem Umfang und Zeitraum realisiert werden können und ein Kernstromerzeugungsdefizit durch Einsatz von Steinkohle ausgeglichen werden müßte. Knüpft man an die Ausführungen des vorangehenden Kapitels III-3 an und geht davon aus, daß 1985 nur 18  $\text{GW}_e$  anstatt der vorgesehenen 24  $\text{GW}_e$  und 1990 nur 28  $\text{GW}_e$  anstatt der vorgesehenen 40  $\text{GW}_e$  zur Verfügung stehen und deshalb das Kernstromerzeugungsdefizit über 39  $\text{GW}_e$  im Jahre 1985

auf 78 GW<sub>e</sub> im Jahre 1990 anwachsen würde, so ergäbe sich unter der Annahme, daß dieses Defizit nur durch Einsatz von Steinkohle ausgeglichen wird, bei einer Kostendifferenz Kernstrom/Steinkohlestrom von 0,03 DM/kWh eine kumulierte Mehrbelastung von 6,82 Mrd DM bis 1990. Diese Berechnung hat jedoch modellmäßigen Charakter, da anzunehmen ist, daß bei einer solchen Entwicklung die elektrizitätswirtschaftlichen Unternehmen auch andere fossile Energieträger zur Deckung des Kernstromerzeugungsdefizits einsetzen würden. Wie sich dies auf die Kosten der Stromversorgung auswirken würde, ist kaum abzuschätzen.

Bei einer umfassenden volkswirtschaftlichen Kostenbetrachtung müßten neben einzelwirtschaftlichen Kosten auch die sozialen Kosten berücksichtigt werden, d.h. die Kosten, die mit der Stromproduktion bei Dritten und der Allgemeinheit anfallen. Hier ergeben sich vielfältige Probleme bei der Eingrenzung zu berücksichtigender Kostenfaktoren sowie bei deren Zurechnung, Erfassung, Quantifizierung und Bewertung. Dies trifft in besonderem Maße für die negativen Auswirkungen der Stromproduktion auf andere Produktionsaktivitäten und auf die Lebensbedingungen (sog. externe Effekte) zu. Deren kostenmäßige Erfassung ist, wie die Diskussion einiger Versuche in dieser Richtung zeigt, bisher noch nicht in befriedigender Weise möglich. Lediglich für staatliche Leistungen zur Sicherstellung der Stromproduktion in Form von Forschungs- und Entwicklungsausgaben oder Subventionszahlungen, die auch unter die sozialen Kosten subsumiert werden können, ist - allerdings unter vereinfachenden Annahmen - eine Quantifizierung möglich. Allerdings ist die Zurechenbarkeit zu den Stromerzeugungskosten umstritten, weil mit diesen Förderungsmaßnahmen auch andere, z.B. strukturpolitische Zielsetzungen verfolgt werden. In den entsprechenden Berechnungen wurden deshalb nur die staatlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben berücksichtigt, die unmittelbar im Zusammenhang mit der LWR-Technologie stehen. Entsprechend wurden auch nur die Kohlesubventionen einbezogen, die für die Verstromung von Steinkohle gezahlt werden.

Die Berechnungen ergeben, daß bei einer installierten Kernkraftwerkskapazität von 10 000 MW<sub>e</sub>, die Anfang 1979 in etwa erreicht werden dürfte, und einer angenommenen Betriebsstundenzahl von 7000 h/a eine Umlage der staatlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben im Zusammenhang mit der LWR-Technologie zu einer Erhöhung der Kernstromerzeugungskosten von 0,64 Dpf/kWh führen würde.

Die Subventionszahlungen für die Verstromung deutscher Steinkohle führen zu einer Kostenentlastung bei den Stromerzeugern, da dadurch ein Teil der einzelwirtschaftlichen Gestehungskosten vom Staat<sup>+)</sup> übernommen wird; die Kohlestromerzeugungskosten werden dadurch nicht tangiert. Berücksichtigt man die wichtigsten - neue oder neu zu bauende Kraftwerke betreffenden - Subventionsarten nach den Verstromungsgesetzen (Investitionskostenzuschuß in Höhe von DM 180 pro Kilowatt installierter Leistung; Brennstoffkostenzuschüsse nach § 3 b der Novelle des 3. Verstromungsgesetz vom 19.12.77), so errechnet sich eine Kostenentlastung für die Stromerzeuger von 0,8 Dpf/kWh.

##### 5. Finanzierungsfragen des Kernenergieausbaus

Nach den ersten Erfahrungen mit Anlagen der 300- und 400-MW-Klassen werden in der Bundesrepublik Deutschland seit 1971 Kernkraftwerke mit einer Bruttoleistung von 1300 MW gebaut. Sowohl durch den Übergang zu bisher unüblichen Größen bei einer einzelnen Kraftwerksanlage als auch infolge der geplanten Ausweitung der Kraftwerkskapazitäten vor allem durch den Zubau von kapitalintensiven Kernkraftwerken, die je installierter Leistungseinheit (kW) mehr finanzielle Mittel als jeder konventionelle Kraftwerkstyp binden, kommen auf die Elektrizitätsversorgungsunternehmen erhebliche Finanzierungsaufgaben zu. Infolgedessen wurden immer wieder Befürchtungen über die Finanzierbarkeit des Kernenergieausbaus laut, einerseits im Hinblick auf das Volumen der Finanzierungsanforderungen, andererseits im Hinblick auf die einzelwirtschaftlichen Finanzierungsmöglichkeiten.

---

<sup>+) Die Subventionen werden aus einem Sondervermögen des Bundes gezahlt, dessen Einnahmen aus der Erhebung des "Kohlepfennigs" resultieren.</sup>

### Volumen der Finanzierungsanforderungen

Vorliegende Berechnungen, die bis 1985 für die zukünftigen Finanzierungsanforderungen durch den Ausbau der Kernenergie Beträge zwischen 60 und 90 Mrd DM ausweisen, wurden unter dem Eindruck der Ölkrise von 1973/74 erstellt und gehen von inzwischen nicht mehr realistischen Kernenergieausbauplanungen zwischen 40 000 und 50 000 MW bis 1985 aus. Dennoch spiegeln sie für heute in etwa zutreffende Größenordnungen des finanziellen Volumens wider, weil der inzwischen erfolgten Reduzierung der Ausbauplanung ein in etwa gleich großer gegenläufiger Trend bei der Entwicklung der Gesamtaufwendungen je Kernkraftwerk gegenübersteht. So betrug das spezifische Finanzierungsvolumen (Investitionsvolumen zusätzlich der während der Bauzeit anfallenden Zinsen und Steuern) für ein Ende 1971 in Auftrag gegebenes Kernkraftwerk 912 DM/kW; für ein Kernkraftwerk, das 1977 bestellt wurde und 1983 in Betrieb gehen soll, wird das spezifische Finanzierungsvolumen bereits auf rd. 2500 DM/kW veranschlagt. Damit kostete ein 1300 MW-Kernkraftwerk mit Baubeginn im Jahre 1971 rd. 1,19 Mrd DM, während bei einer Bestellung im Jahre 1977 bereits mit 3,25 Mrd DM zu rechnen ist. Neben einer inflatorischen Steigerung der Lohn- und Materialkosten ist diese Erhöhung vor allem auf eine Verlängerung der Bauzeit und auf gleichzeitig erhöhte Sicherheits- und Umweltschutzaufgaben zurückzuführen. Bei Kernkraftwerken vom Typ Biblis B, die etwa 1985 ihren Betrieb aufnehmen sollen, wird jetzt mit Gesamtkosten von rd. 3,5 Mrd DM gerechnet.

Die hier vorgenommene Überschlagsrechnung für die jährlichen Finanzierungsanforderungen geht von den jüngsten energiepolitischen Planungen und den neuesten Kostenschätzungen aus. Sie bezieht auch die anderen Investitionen der Elektrizitätswirtschaft ein, um das Gesamtvolumen der Finanzierungsanforderungen zu verdeutlichen. Zugrundegelegt sind ein Ausbau der Kernenergie auf 24 000 MW bis zum Jahre 1985 und auf 40 000 MW bis zum Jahre 1990, eine Bauzeit von 6 Jahren sowie ein Finanzierungsvolumen in Höhe von 3,5 Mrd DM für ein LWR-Kraftwerk von rd. 1300 MW. Die Berechnungen ergeben für den Zeitraum 1979 bis 1990 eine jahresdurchschnittliche Finanzierungsbelastung der Elektrizitätswirtschaft durch den Kernenergieausbau von 7,35 Mrd DM. Berücksichtigt

man weiterhin Investitionen für fossile Kraftwerke (2,66 Mrd DM jährlich)<sup>f)</sup> sowie erforderliche Netzinvestitionen und sonstige Investitionen der Elektrizitätswirtschaft (10 Mrd DM jährlich)<sup>++)</sup>, so kommt man zu einer jahresdurchschnittlichen Finanzierungsbelastung von ca. 20 Mrd DM für diesen Zeitraum, was eine Verdoppelung gegenüber dem Investitionsvolumen der Elektrizitätswirtschaft in der Mitte der 70er Jahre bedeuten würde.

Eine Betrachtung der Entwicklung des Investitionsvolumens der Elektrizitätswirtschaft in der Vergangenheit zeigt, daß die Elektrizitätswirtschaft bereits ähnlich hohe Steigerungen verkraftet hat. So ist das nominelle Investitionsvolumen von 1965 bis 1975 um das Zweieinhalbfache, von 1970 bis 1975 allein um das Zweifache gestiegen. Im Hinblick auf die überschlagsmäßig ermittelten Finanzierungsanforderungen in den 80er Jahren steht die Elektrizitätswirtschaft deshalb in der Zukunft weniger vor einer völlig neuen Situation als vielmehr in der Kontinuität steigender Finanzierungsanforderungen.

In bezug auf Verzögerungen im Kernkraftwerksausbau kann zunächst festgestellt werden, daß sie zu Erhöhungen des Finanzierungsvolumens führen und somit den finanziellen Spielraum der betroffenen Elektrizitätsversorgungsunternehmen erheblich einengen. Der verzögerungsbedingte Mehraufwand setzt sich nicht nur aus Preis- und Zinssteigerungen sowie Aufwendungen für zusätzlich geforderte sicherheitstechnische Einrichtungen zusammen, sondern kann gegebenenfalls auch Aufwendungen für die Ersatzstrombeschaffung umfassen. Berechnungen weisen als jährliche Verzögerungskosten eine Spanne zwischen 320 Mio DM

---

+) Aufgrund veröffentlichter Planungsdaten wird bei fossilen Kraftwerken von einem Neubau von insgesamt 16 000 MW im Zeitraum von 1979 bis 1990 ausgegangen.

++) Das Investitionsvolumen der Elektrizitätswirtschaft verteilt sich zur Zeit je zur Hälfte auf den Erzeugungsbereich und den Verteilungsbereich (einschließlich sonstiger Investitionen). Dieses Verhältnis wurde auch bei der Abschätzung der zukünftigen Entwicklung zugrundegelegt.

und 900 Mio DM aus. Sofern diese Verzögerungen nicht zu Stromversorgungsschwierigkeiten führen, dürfte der Haupteffekt gesamtwirtschaftlich in Erhöhungen des volkswirtschaftlichen Preisniveaus liegen, wobei eine Überwälzung dieser Kosten auf die Stromverbraucher angenommen wird. Dadurch könnte sich die Wettbewerbsposition, insbesondere für stromintensive Industriezweige, auf den Exportmärkten verschlechtern, sofern diesen inländischen Preisniveausteigerungen keine entsprechenden Preisniveausteigerungen im Ausland gegenüberstehen.

### Einzelwirtschaftliche Finanzierungsmöglichkeiten

Durch den Übergang zu Kraftwerken mit erheblich höherer Leistung als bisher ergeben sich entsprechend höhere Finanzierungsbelastungen pro Einzelprojekt für die Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Aus diesem Grunde wurden im Zusammenhang mit dem Bau von Kernkraftwerken verschiedentlich finanzierungstechnische und -rechtliche Sonderregelungen (u.a. erhöhte steuerliche Abschreibungen, Lockerungen der Besicherungsvorschriften) gefordert. Hierzu ist zunächst festzustellen, daß zur Durchführung der bisherigen Kernkraftwerksinvestitionen keine einschneidenden Veränderungen der Finanzierungsbedingungen erforderlich waren. Dies ist sicherlich nicht zuletzt auf den gegenüber früheren Planungen reduzierten Kernkraftwerksausbau zurückzuführen. Aber auch zur Realisierung des geplanten zukünftigen Kernenergieausbaus scheinen nach einer Analyse des Innen- und Außenfinanzierungsinstrumentariums wesentliche Änderungen der gesetzlichen Voraussetzungen nicht erforderlich zu sein. Zudem werden von der Elektrizitätswirtschaft mit den Gemeinschaftskraftwerken und - in Zusammenarbeit mit den Banken - mit dem Leasing verstärkt neue Wege beschritten, die ihre einzelwirtschaftliche Finanzierungsaufgabe erleichtern. Entscheidende Voraussetzung für eine möglichst reibungslose Bewältigung der Finanzierungsaufgaben ist jedoch in jedem Fall eine stabile Absatz- und Erlössituation der Elektrizitätswirtschaft, die bei normaler wirtschaftlicher Entwicklung gegeben sein dürfte.



Wenn der Kernkraftwerkskapazitätsausbau allerdings über die derzeitigen Planungen hinaus betrieben wird, könnten die bereits in der ersten Hälfte der 70er Jahre diskutierten möglichen Änderungen der Finanzierungsbedingungen der Elektrizitätswirtschaft wieder an Aktualität gewinnen.

## 6. Chancen und Probleme des Exports kerntechnischer Anlagen

In diesem Kapitel wird zunächst auf der Basis vorliegender Abschätzungen des zukünftigen weltweiten Kernenergieeinsatzes ein sehr grober quantitativer Rahmen für den gesamten Export von Kernkraftwerken bis zum Jahre 2000 abgesteckt. Es folgt eine Detailanalyse des internationalen Marktes für Nukleartechnologie unter besonderer Berücksichtigung der Anbieterposition der Bundesrepublik Deutschland.

In einem abschließenden Abschnitt werden die wechselseitigen Beziehungen zwischen dem Nuklearexport und der Politik der Nichtverbreitung von Kernwaffen untersucht.

Nach Schätzungen internationaler Expertengruppen und Organisationen wird der weltweite Zuwachs an Kernkraftwerkskapazität bis zum Jahr 2000 in einer Bandbreite zwischen mindestens 500 GW<sub>e</sub> und höchstens 1500 GW<sub>e</sub> (ohne Ostblockländer und China) liegen, mit einer deutlichen Tendenz zur unteren Annahme. Das Verhältnis zwischen Inlands- und Exportaufträgen beträgt bisher ungefähr 4 zu 1. Geht man davon aus, daß es auch zukünftig in etwa bei diesem Verhältnis bleibt, so würde sich eine voraussichtliche Spanne für Exportaufträge bis zum Jahre 2000 von etwa 100-300 GW<sub>e</sub> ergeben.

Auf dem internationalen Markt für Nukleartechnologie zeichnen sich folgende, die Marktchancen der Kernkraftwerksexporteure beeinträchtigende Tendenzen ab:

- Eine zunehmende Zahl von Ländern ist in der Lage, einen Teil der benötigten Kernkraftwerkskomponenten selbst zu produzieren. Damit sinkt der Importbedarf bei einer Reihe der bisherigen Abnehmerländer.
- Das Bestreben solcher Länder geht in vielen Fällen dahin, durch einen weiteren Ausbau ihrer kerntechnischen Industrie den gesamten eigenen Kernkraftwerksbedarf künftig selbst decken zu können, auswärtige Konkurrenten faktisch auszuschließen und somit zu einem "geschlossenen Markt" zu werden. Die Anzahl solcher "geschlossener Märkte" wird zunehmen.
- Der Wettbewerb konzentriert sich zunehmend auf die Märkte der Entwicklungsländer in Lateinamerika, Afrika und Asien, die aufgrund ihres industriellen Entwicklungsstandes noch nicht in der Lage sind, nennenswerte eigene Herstellkapazitäten für die Nukleartechnologie aufzubauen. Auf diesen "offenen Märkten" werden auf längere Zeit noch komplette schlüsselfertige Anlagen nachgefragt werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß die Installierung eines Kernkraftwerks einen Mindeststandard in der Elektrizitätsversorgung voraussetzt, über den gegenwärtig sehr viele Entwicklungsländer noch gar nicht verfügen.
- Die Zahl der Wettbewerber auf dem Weltmarkt für Nukleartechnologie dürfte weiter ansteigen. Das Interesse an Exportaufträgen wächst in dem Maße bei den Produzenten kerntechnischer Anlagen, wie sie aufgrund reduzierter nationaler Ausbauplanungen die vorhandenen Kapazitäten durch Inlandsaufträge allein nicht mehr auslasten können.

Als Anbieter auf dem internationalen Markt für Nukleartechnologie (wiederum ohne Ostblockländer und China) konkurrieren gegenwärtig vor allem Hersteller aus den USA (bisheriger Marktanteil rund 60 %), der Bundesrepublik Deutschland (rund 20 %) und Frankreich (rund 10 %). Daneben treten Kanada, Großbritannien, Schweden und neuerdings auch die Sowjetunion auf dem Exportmarkt in Erscheinung.

Bis vor einigen Jahren hatten die USA praktisch eine Monopolstellung auf dem internationalen Markt für Nukleartechnologie eine Position, die nicht nur auf den erheblichen Entwicklungsvorsprung der USA im Bereich der Nukleartechnologie zurückzuführen war, sondern auch auf die Existenz eines Netzes von Forschungs- und Entwicklungskooperationen mit zahlreichen Ländern, durch die günstige Voraussetzungen für den Nuklearexport geschaffen wurden. Inzwischen ist die Angebotsmonopolstellung der Amerikaner auf dem Weltmarkt für Nukleartechnologie nicht mehr gegeben. Insbesondere Frankreich und die Bundesrepublik Deutschland haben den technologischen Vorsprung der USA weitgehend eingeholt. Der Wettbewerb zwischen ihnen und den USA wird zunehmend schärfer.

Als besonders eng mit dem Weltmarkt verflochtenes hochentwickeltes Industrieland ist die Bundesrepublik Deutschland darauf angewiesen, ihr Produktions- und Exportpotential der sich verändernden Struktur der Weltwirtschaft arbeitsteilig anzupassen. Für die zukünftige Exportstrategie der Bundesrepublik bedeutet dies eine zunehmende Schwerpunktverlagerung auf besonders hochwertige Konsum- und Investitionsgüter sowie auf technische Großanlagen und technisch-organisatorisches know-how. Im Rahmen einer solchen Strategie wird der Ausfuhr nuklearer Technologien ein erhebliches Gewicht beigemessen. Die Bundesregierung verfolgt dabei offiziell nicht den Weg einer kurzfristigen Exportorientierung, sondern strebt mit entsprechenden Partnerländern eine langfristige Kooperation an, die in wachsendem Maße die Industrie der Empfängerländer einbezieht, um so eine Basis für gemeinsame Investitionen und joint ventures zu schaffen.

Nach Angaben des führenden deutschen Herstellers, der Kraftwerk Union, wurden in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1974 und 1975 10 Kernkraftwerke in Auftrag gegeben, von denen Mitte 1977 nur an zwei Baustellen gearbeitet werden konnte. Diese Diskrepanz zwischen Auftragsbestand und tatsächlicher Fertigung kann allein durch den Export kompensiert werden. Nach Angaben der Kraftwerk

Union liegt die untere Wirtschaftlichkeitsgrenze für die vorhandenen Kapazitäten bei 4-5 Kernkraftwerksaufträgen im Jahr. Da dieses Auftragsvolumen auf absehbare Zeit in der Bundesrepublik Deutschland nicht eingebracht werden kann, gelten mindestens zwei Exportaufträge pro Jahr als erforderlich.

Bis Frühjahr 1978 konnte die deutsche Kraftwerksindustrie Exportaufträge für insgesamt 15 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von ca. 16 GW<sub>e</sub> erzielen, davon 6 in Westeuropa mit knapp 6 GW<sub>e</sub> und 9 in Entwicklungsländern mit ca. 10 GW<sub>e</sub>. Dabei sind alle Projekte berücksichtigt, für die zumindest ein Letter of Intent vorlag. Die Projekte verteilen sich innerhalb Europas auf Luxemburg, die Niederlande, Österreich, die Schweiz und Spanien, außerhalb Europas auf Argentinien, Brasilien und den Iran.

Auf dem europäischen Markt (ohne Comecon-Länder) hat die Bundesrepublik Deutschland bisher einen Anteil von 16 % (bezogen auf die Gesamtleistung der in Betrieb oder in Bau befindlichen oder fest bestellten Anlagen in den Kernkraftwerksimportländern). Anfang 1978 waren auf diesem Markt weitere 48 Anlagen mit einer Gesamtleistung von rund 46 GW<sub>e</sub> konkret projektiert oder geplant, für die noch keine Auftragnehmer festliegen. Geht man von der Beibehaltung des bisherigen Marktanteils aus, so würde der Anteil deutscher Exporte daran etwa 7 GW<sub>e</sub> betragen. Auch bei sehr optimistischer Einschätzung ist kaum damit zu rechnen, daß dieser Anteil 10 GW<sub>e</sub> überschreiten könnte.

Bei den Entwicklungsländern schwanken die Zuwachsschätzungen für Kernkraftwerkskapazitäten zwischen 200 und 300 GW<sub>e</sub> bis zum Jahr 2000; allerdings werden diese Schätzungen ständig reduziert. Die Chancen für Exportaufträge hängen hier in besonderem Maße davon ab, ob bereits Auftragsbeziehungen im Bereich der Nukleartechnologie bestehen, die normalerweise Anschlußaufträge begünstigen. Auch durch die Existenz von Forschungs- und Entwicklungskooperationen auf dem Sektor der Nukleartechnologie werden künftige Ex-

portaufträge begünstigt. Bis 1977 hatte die Bundesrepublik Deutschland spezielle Abkommen über die Zusammenarbeit im Bereich der friedlichen Nutzung der Kernenergie mit Brasilien, Indien, Indonesien und dem Iran abgeschlossen. Darüber hinaus bestehen mit vielen Entwicklungsländern Rahmenabkommen über die Zusammenarbeit auf wissenschaftlich-technischem Gebiet.

Der Export von Nukleartechnologie ist eng verknüpft mit der Problematik der Nichtweiterverbreitung von kernwaffenfähigem Material. Besonders strittige Probleme sind in diesem Zusammenhang die Kontrolle des Brennstoffkreislaufs bei Importländern, die dem Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (NV-Vertrag) nicht beigetreten sind, die Kontrolle des Exports von Urananreicherungs- und Wiederaufarbeitungsanlagen (sensitive Anlagen) und die Weitergabe von kerntechnischem know-how. Es gibt zunehmende nationale und internationale Bemühungen, diese Probleme einer befriedigenden Lösung näher zu bringen. Zu diesen Bemühungen zählen insbesondere die Formulierung und Anwendung gemeinsamer "Richtlinien für den Nuklearexport" durch die Exportländer für Nukleartechnologie; die Durchführung eines "internationalen Programms zur Bewertung des nuklearen Brennstoffkreislaufs" (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation / INFCE), das etwa Ende 1979 abgeschlossen sein soll; und die Verabschiedung des "Nuclear Non-Proliferation Act" durch den amerikanischen Kongreß im Februar 1978, welches das Ergebnis eines jahrelangen Prozesses zunehmender Beschränkungen des amerikanischen Nuklearexports durch Verschärfung von Genehmigungskriterien und -verfahren unter besonderer Berücksichtigung des Ziels der Nichtverbreitung von Kernwaffen darstellt.

#### IV. Umweltauswirkungen der Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufes

##### 1. Überblick

Die ökologische Problematik jeder Energieerzeugung wird durch stoffliche Emissionen und durch Abwärmeemissionen verursacht. Energieerzeugung aus Kernreaktoren bringt weiterhin die Notwendigkeit der sicheren Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit sich. In diesem Teil der Studie werden die Umweltauswirkungen der Emissionen von Kernkraftwerken und Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufs, soweit mit heute vorhandenen Daten und Modellen möglich, quantifiziert und dabei die Brennstoffkreisläufe verschiedener Reaktorsysteme verglichen. In den Vergleich wird darüber hinaus auch die Strahlenbelastung durch Steinkohlekraftwerke einbezogen.

Da der quantitative Vergleich nur für den Teilbereich der Strahlenbelastung aus energieerzeugenden Anlagen und Anlagen des zugehörigen Brennstoffkreislaufs durchgeführt werden konnte, wird, um eine Gesamtbewertung der Umweltbelastungen durch die Energieerzeugung möglich zu machen, ein Überblick über den Kenntnis- und Diskussionsstand zu einer Reihe weiterer Einzelfragen gegeben. Dies betrifft zum Beispiel die Probleme der Abwärmeabgabe aus energieerzeugenden Anlagen. Weiterhin wird die biologische Strahlenwirkung auf den menschlichen Organismus behandelt, um eine Beurteilung der erhaltenen organspezifischen Strahlenbelastungen aus energieerzeugenden Anlagen zu ermöglichen.

Die Rechnungen zur Strahlenbelastung müssen die lokalen, die regionalen und die globalen Belastungsanteile aufzeigen. In dieser Studie werden im wesentlichen nur die Strahlenbelastungen in der näheren Umgebung der Anlagen untersucht (bis 10 km Entfernung von der Emissionsquelle). Eine Erweiterung der Vergleichsrechnungen auf größere Regionen und auf die globale Erhöhung des Strahlenpegels ist noch zu leisten. Dabei wird dann auch die Kollektivbelastung zu berücksichtigen sein, d.h. die Summe aller Einzelbelastungen der betroffenen Personen, um die Voraussetzungen für eine möglichst umfassende Abschätzung der somatischen und genetischen Risiken zu schaffen.

Lediglich für eine Modellregion, die Oberrheinregion, für die die zukünftige Kernenergieausbauplanung bereits hinreichend bekannt ist, wird in dieser Studie eine Regionalanalyse durchgeführt. Eine regionsspezifische Gesamtanalyse der ökologischen Auswirkungen eines großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland entsprechend einer vorgegebenen Prognose des Kernenergieeinsatzes erscheint erst dann sinnvoll, wenn außer einer Energiegesamtplanung auch die zugehörige Standortplanung vorliegt.

Die Strahlenbelastungen werden, außer für einen angenommenen sog. Kritikalitätsstörfall in einer Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannte Kernbrennstoffe, nur für Normalbetriebsbedingungen der Anlagen errechnet. Die potentiellen Strahlenbelastungen bei Störfällen in den Anlagen sind Thema spezieller Risikostudien. Hier werden nur einige grundlegende Sicherheitseigenschaften verschiedener Reaktortypen zusammengestellt, anhand derer dann in weiteren Arbeiten reaktorspezifische Emissionsdatensätze für Störfälle entwickelt werden können. Weiterhin werden die Sicherheitsprobleme bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle dargestellt. Unter anderem wird der zeitliche Verlauf des Gefahrenpotentials für verschiedene Brennstoffkreisläufe aufgezeigt.

Im folgenden werden nur die Ergebnisse der Studie

- (1) zur Strahlenbelastung durch verschiedene Reaktorsysteme,
- (2) zur organspezifischen Strahlenbelastung aus den Emissionen von Kohlekraftwerken und
- (3) zur biologischen Strahlenwirkung auf den menschlichen Organismus dargestellt.

## 2. Vergleich der Strahlenbelastung durch verschiedene Reaktorsysteme

Bei dem Vergleich der Strahlenbelastung durch verschiedene Reaktorsysteme wird von den Abluft- und Abwasseremissionen bei Normalbetrieb der Reaktoren - LWR, SBR und HTR - sowie von den Abluftemissionen bei der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennstoffe dieser Reaktoren ausgegangen.

Die Strahlung der aus kerntechnischen Anlagen abgeleiteten radioaktiven Stoffe kann den Menschen auf verschiedenen Expositionspfaden erreichen. Bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft und dem Abwasser sind dabei die folgenden Expositionspfade von Bedeutung:

- (1) externe  $\beta$ -Strahlung innerhalb der Abluftfahne ( $\beta$ -Submersion);
- (2) externe  $\gamma$ -Strahlung aus der Abluftfahne ( $\gamma$ -Submersion);
- (3) externe  $\gamma$ -Strahlung der am Boden abgelagerten Aktivität (Bodenstrahlung);
- (4) interne Bestrahlung durch Radionuklide, die mit der Luft inhaliert werden (Inhalation);
- (5) interne Bestrahlung durch Verzehr kontaminierter Nahrungsmittel (Ingestion).

Während die Expositionspfade (1) bis (4) nur für Abluftemissionen zu berücksichtigen sind, kann eine Strahlenbelastung über den Expositionspfad "Ingestion" sowohl über Abluft- als auch über Abwasseremissionen und dabei wiederum über verschiedene Einzeltransferrouen erfolgen.

In Abb. IV-1 ist die Transferroue "Abluft - Boden - Pflanze - pflanzliche Nahrung - Mensch" beispielhaft dargestellt; bezüglich der anderen Transferrouen gelten ähnliche Darstellungen. Ausgehend von der hier gasförmig angenommenen Emission der Anlage (Ci/s) erfolgt Ausbreitung und Verdünnung in Luft. Diese Vorgänge führen zur Immission beispielsweise



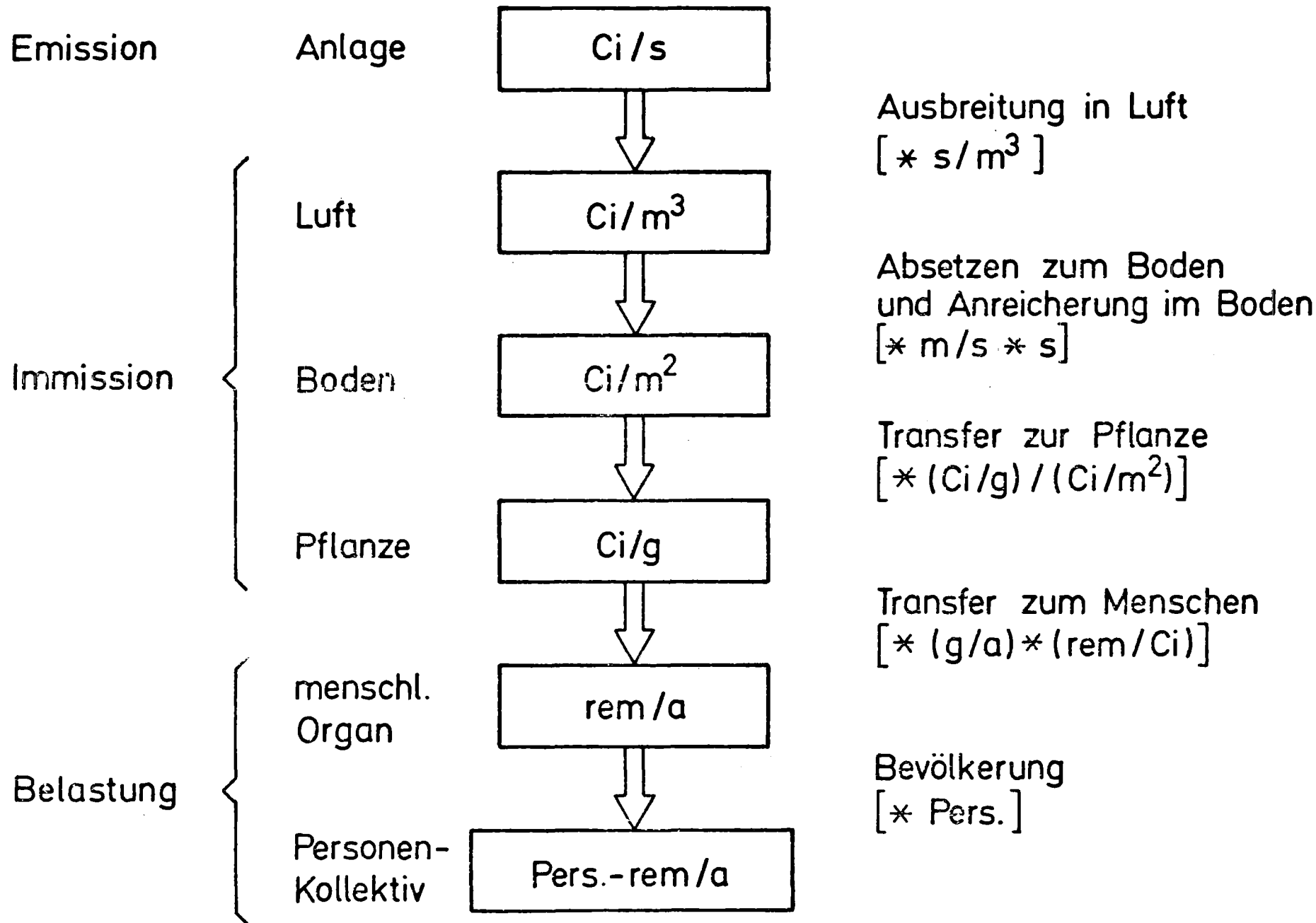


Abb. IV-1: Transferroute "Luft-Boden-Pflanze-pflanzliche Nahrung-Mensch"

in Bodennähe. Ein Rechenmodell liefert den ortsabhängigen sogenannten "Ausbreitungsfaktor" ( $s/m^3$ ); Multiplikation der Emission mit dem Ausbreitungsfaktor liefert die Immission ( $C_i/m^3$ ). Ablagerung der in der bodennahen Luftschicht enthaltenen Radionuklide führt mittels der Absetzgeschwindigkeit ( $m/s$ ) während eines vorzugebenden Anreicherungszeitraums zu einer Immission auf der Bodenoberfläche ( $C_i/m^2$ ). Die Radionuklide wandern während des Anreicherungszeitraums in tiefere Bodenschichten und werden von den Pflanzen aufgenommen. Über pflanzliche Nahrungsmittel gelangt die Bodenimmission schließlich in menschliche Organe ( $C_i/g$ ). Nach Berücksichtigung des sogenannten "Dosisfaktors" ( $rem/C_i$ ) ergibt sich die radiologische Belastung des betrachteten menschlichen Organs ( $rem/a$ ). Zur Untersuchung somatischer und genetischer Folgen der Strahlenbelastung wird auch die Bevölkerungsbelastung ( $Pers.-rem/s$ ) zugrundegelegt; letztere kann bei geeigneter Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung berechnet werden.

Die Einzelansätze zur Berechnung der Strahlenbelastung über verschiedene Expositionspfade gehen z.T. von idealisierten Bedingungen aus, wie z.B. der Annahme eines unendlichen Verdünnungspotentials der Atmosphäre, der Stationarität und Homogenität der atmosphärischen Ausbreitungsverhältnisse und einer kontinuierlichen Emissionsquellstärke. Für die Expositionspfade  $\gamma$ -Bodenstrahlung und Ingestion wird eine Radionuklidanreicherung auf dem Boden bzw. im Boden während eines Zeitraums von 50 Jahren betrachtet. Bei der Berechnung der Dosisfaktoren für interne Strahlenbelastung durch Inhalation und Ingestion von Radionukliden wird ebenfalls eine Expositionszeit von 50 Jahren angenommen, d.h. die gesamte während dieses Zeitraums verursachte interne Strahlenbelastung wird der Jahresbelastung des Aufnahmejahres des entsprechenden Radionuklids zugerechnet. Der Hauptteil der Belastung entsteht dabei in fast allen Fällen während eines relativ kurzen Zeitraums unmittelbar nach Aufnahme eines Radionuklids, da biologischer Abbau und physikalischer Zerfall die Radionuklidkonzentration in den entsprechenden Organen verringern.

Es sollte betont werden, daß bezüglich der Transferraten und der Dosisfaktoren die Diskussion derzeit noch nicht abgeschlossen ist. So wurden die

aus /BMI (1977a)/ entnommenen Inhalationsdosisfaktoren mit dem sog. alten Lungenmodell errechnet; Vergleichsrechnungen mit dem sog. neuen Lungenmodell, durchgeführt für das Isotop Plutonium-239, ergaben, daß mit dem alten Lungenmodell die Lungendosis unterschätzt und die Knochendosis überschätzt wird /PAPADOPOULOS, D. (1978)/.

#### Ausgangsdaten für die Emissionen der Kernkraftwerke und Wiederaufarbeitungsanlagen

Als Grundlage für die Ermittlung normierter, d.h. auf  $1 \text{ GW}_e \cdot \text{a}$  bezogener, Aktivitätsfreisetzungen der radiologisch wichtigsten Nuklide aus Kernkraftwerken dienten Untersuchungen der Autoren /BAYER, A. (1978), PAPP, R. (1977), SCHÜCKLER, M. (1978)/. Beim LWR konnte dabei auf Meßwerte von Emissionen bei bestehenden Anlagen zurückgegriffen werden. Für die fortgeschrittenen Reaktoren (SBR und HTR) ist die Datenbasis erheblich unsicherer. Die Zusammenstellung der Emissionen in Tab. IV-1 und IV-2 beruht auf Werten aus einem großen Schwankungsbereich von Emissionsangaben, wie sie der Literatur und Betriebserfahrungen von Kernkraftwerken entnommen werden können. Die Werte stellen daher nur pauschale Durchschnittswerte dar. Es wurde versucht, sich dabei an den technischen Voraussetzungen deutscher Reaktorkonzepte zu orientieren. Die angegebenen Werte sind somit als Abschätzung der mittleren Emissionen bei Normalbetrieb der Kraftwerke zu verstehen. Sie sind von den Genehmigungswerten für die Emissionen zu unterscheiden, die meist erheblich höher sind.

Um die Emissionen der Wiederaufarbeitungsanlagen der verschiedenen Reaktorsysteme zu erhalten, wurden Abbrandrechnungen durchgeführt. Es wurde von Kühlzeiten für die Brennelemente bis zur Wiederaufarbeitung von 180, 365 und 3650 Tagen ausgegangen. Die Rückhaltefaktoren (= Verhältnis von durchgesetzter Nuklidmenge in der Anlage zu freigesetzter Nuklidmenge aus der Anlage) wurden für alle Wiederaufarbeitungsanlagen als gleich angenommen. Für die Wiederaufarbeitung von HTR-Brennstoff stellt dies eine

Tabelle IV-1: Emissionen von Radionukliden aus Kernkraftwerken an die Atmosphäre in Ci/GW<sub>e</sub>·a

Nuklid	L W R (DWR)	S B R	H T R
H-3	20	350	20
C-14	6	6	6
Ar-41	30	0	30
Co-58 <sup>+) )</sup>	0.002	0	0
Co-60 <sup>+) )</sup>	0.002	0	0
Kr-85	1200	800	800
Kr-88	40	40	40
J-131	0.06	0.01	0.001
Xe-133	2800	4000	40
Xe-135	200	200	20
Cs-134 <sup>+) )</sup>	0.002	2E-04	3E-07
Cs-137 <sup>+) )</sup>	0.002	2E-04	3E-07

Der Zahlenwert nach E bezeichnet den Exponenten zur Basis 10, z.B. 1.0E+01=10

+) Diese angenommenen Freisetzungsraten sind größer als die tatsächlichen Co- und Cs-Freisetzungsraten, da sie die Gesamtheit aller Aerosole repräsentieren sollen.

Tabelle IV-2: Emissionen von Radionukliden aus Kernkraftwerken an das Abwasser in Ci/GW<sub>e</sub>·a

Nuklid	L W R (DWR)	S B R	H T R
H-3	950	350	950
Co-58	0.2	0.2	0.04
Co-60	0.2	0.2	0.04
Sr-89	0.1	0.1	0.1
Sr-90	0.05	0.05	0.01
Ru-106	0.001	0.001	2E-04
J-131	0.2	0.2	0.04
Cs-134	0.1	0.1	0.1
Cs-137	0.1	0.1	0.2
Ce-144	0.05	0.05	0.01

Der Zahlenwert nach E bezeichnet den Exponenten zur Basis 10, z.B. 1.0E+01=10

Vereinfachung dar, da sich die gewählten Rückhaltefaktoren an der U/Pu-Wiederaufarbeitung mittels des PUREX-Prozesses orientieren. Die gewählten Werte, die als Grundlage für die weiteren Berechnungen dienen, orientieren sich an den Planungen für die deutsche LWR-Wiederaufarbeitungsanlage /DWK (1977)/. Für diese Anlage sind die Installation eines Jod- und eines Edelgasrückhalteverfahrens vorgesehen. Die Anwendung der Tieftemperatur-Rektifikation zur Edelgasabtrennung macht die vorherige Entfernung von Sauerstoff, Stickoxiden und Kohlendioxid aus dem Auflöserabgas notwendig. Damit ist prinzipiell auch die Rückhaltung von Kohlendioxid und somit von Kohlenstoff-14 möglich. Um das Kohlendioxid in eine endlagerfähige Form zu überführen, sind jedoch noch weitere Verfahrensschritte notwendig; bisher ist eine solche Rückhaltung daher nicht vorgesehen. Für die Aerosolrückhaltung werden zwei Fälle unterschieden: eine konservative Annahme des erreichbaren Standes der Rückhaltetechnik (Fall 1) ergibt einen Rückhaltefaktor von  $10^8$ , die Annahme einer fortgeschrittenen Rückhaltetechnik (Fall 2) einen Faktor  $10^9$ . Nach dem bisherigen Konzept der geplanten deutschen LWR-Wiederaufarbeitungsanlage kann angenommen werden, daß der Großteil der Emissionen an die Atmosphäre und nur ein geringer Teil an die Gewässer erfolgt.

Aus den Rückhaltefaktoren ergeben sich als Kehrwerte die sog. Freisetzungsfaktoren, die den Bruchteil der freigesetzten Aktivität, bezogen auf die durchgesetzte Aktivität der Anlage, angeben. In Tab. IV-3 sind die Emissionen für Wiederaufarbeitungskapazitäten der betrachteten Reaktortypen zusammengestellt, die jeweils etwa einer 1400-jährigen LWR-Wiederaufarbeitungsanlage entsprechen. Es wird von einer Kühlzeit der Brennelemente von 365 Tagen und von konservativen Annahmen für die Rückhaltetechnik (Fall 1) ausgegangen. Für die abgebrannten SBR-Brennstoffe wurde angenommen, daß vor der Wiederaufarbeitung die Brennstoffe des Cores, des axialen und des radialen Blankets im Verhältnis 0,50:0,16 vermischt werden. Diese Verhältnisse ergeben sich aus der Volumenwichtung der einzelnen Reaktorzonen unter Berücksichtigung der Leistungsdichten und Standzeiten.

Tabelle IV-3: Emissionen reaktorspezifischer Wiederaufarbeitungsanlagen (WAA) bei Annahme konservativer Rückhaltetechnik (Fall 1) to-LWR-WAA)

Emission: (Ci/a)

Nuklid	LWR-WAA 36 000 Mwd/t SM	SBR-WAA 40 800 Mwd/t SM <sup>+) )</sup>	HTR-WAA 57 000 Mwd/t SM <sup>+) )</sup>	Angenommener Freisetzungsfaktor
H-3	260 000	310 000	144 000	0.25
C-14	1 400	1 100	5 200	1.00
Kr-85	820 000	490 000	1 300 000	0.05
SR-90	1.2	0.6	1.3	10 <sup>-8</sup>
Ru-106	4.4	8.0	0.6	10 <sup>-8</sup>
J-129	0.6	0.5	0.5	0.01
Cs-134	2.9	0.3	1.7	10 <sup>-8</sup>
Cs-137	1.6	1.5	1.3	10 <sup>-8</sup>
Ce-144	7.5	5.9	7.3	10 <sup>-8</sup>
Pu-238	0.05	0.1	0.06	10 <sup>-8</sup>
Pu-239	0.005	0.04	6.2 · 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>
Pu-240	0.007	0.05	1.2 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup>
Pu-241	1.5	6.1	0.04	10 <sup>-8</sup>
Am-241	0.004	0.04	9.5 · 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>
Cm-242	0.11	0.24	1.8 · 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-8</sup>
Cm-244	0.04	0.02	9.4 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup>

<sup>+) )</sup> Mittlerer Abbrand über Core und Blankets

### Ergebnisse zur organspezifischen Belastung

Mit den Modellen zur Berechnung der organspezifischen Strahlenbelastung, die sich auf die Richtlinien des BMI /BMI (1977a und b)/ und des /US NRC (1975)/ stützen, wird ein Belastungsvergleich für verschiedene Reaktor-konzepte durchgeführt. Es wird dabei von den beschriebenen Abluft- und Abwasseremissionen bei Normalbetrieb der Reaktoren - LWR, SBR und HTR - und den Abluftemissionen bei der Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennstoffe dieser Reaktoren ausgegangen. Für den HTR werden zwei unterschiedliche Abbrände betrachtet. Es werden die organspezifischen Strahlenbelastungen in der unmittelbaren Umgebung der Emissionsquellen untersucht. Für die Reaktoren wird eine Emissionshöhe von 100 m und für die Wiederaufarbeitungsanlagen von 200 m angenommen. Den angewandten Ausbreitungsfaktoren, d.h. den auf die Quellstärke normierten Immissionswerten, liegt die Ausbreitungsklassenstatistik des Deutschen Wetterdienstes Offenbach für die Wetterstation Hannover-Langenhagen zugrunde. Zur Berechnung der Ablagerung der Nuklide durch Niederschlag (Washout) wird von einer mittleren Niederschlagshöhe von 200 mm/a in der betrachteten Hauptwindrichtung ausgegangen, was eine pessimistische Abschätzung darstellt. Es wurde Abwassereinleitung in das Kühlwasser eines 1000 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerks und anschließende Verdünnung im Vorfluter angenommen. Bei einer Kühlwassermenge von etwa 50 m<sup>3</sup>/s für ein 1000 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerk und einer Verdünnung im Vorfluter um den Faktor 10 ergibt sich damit eine Gesamtverdünnung des Abwassers auf die Wassermenge von 500 m<sup>3</sup>/s.

Die berechneten organspezifischen Dosisraten sind als Ortsdosisraten zu verstehen. Sie beschreiben die fiktive Belastung eines Erwachsenen, der sich während des gesamten Jahres am betreffenden Ort in der Umgebung der Anlage aufhält und der darüber hinaus seine Nahrung aus Lebensmitteln bezieht, die ihren Ursprung in landwirtschaftlichen Aktivitäten am betreffenden Ort haben. Es wird dabei von mittleren Verzehrsgewohnheiten - entsprechend /BMI (1977a)/ - ausgegangen. Weiterhin wird 100 %-ige Nutzung des Flußwassers als Trinkwasser angenommen.

Abb. IV-2 zeigt für Knochen, Schilddrüse und den Ganzkörper den Verlauf der Strahlenbelastung durch Abluftemissionen bei den hier betrachteten

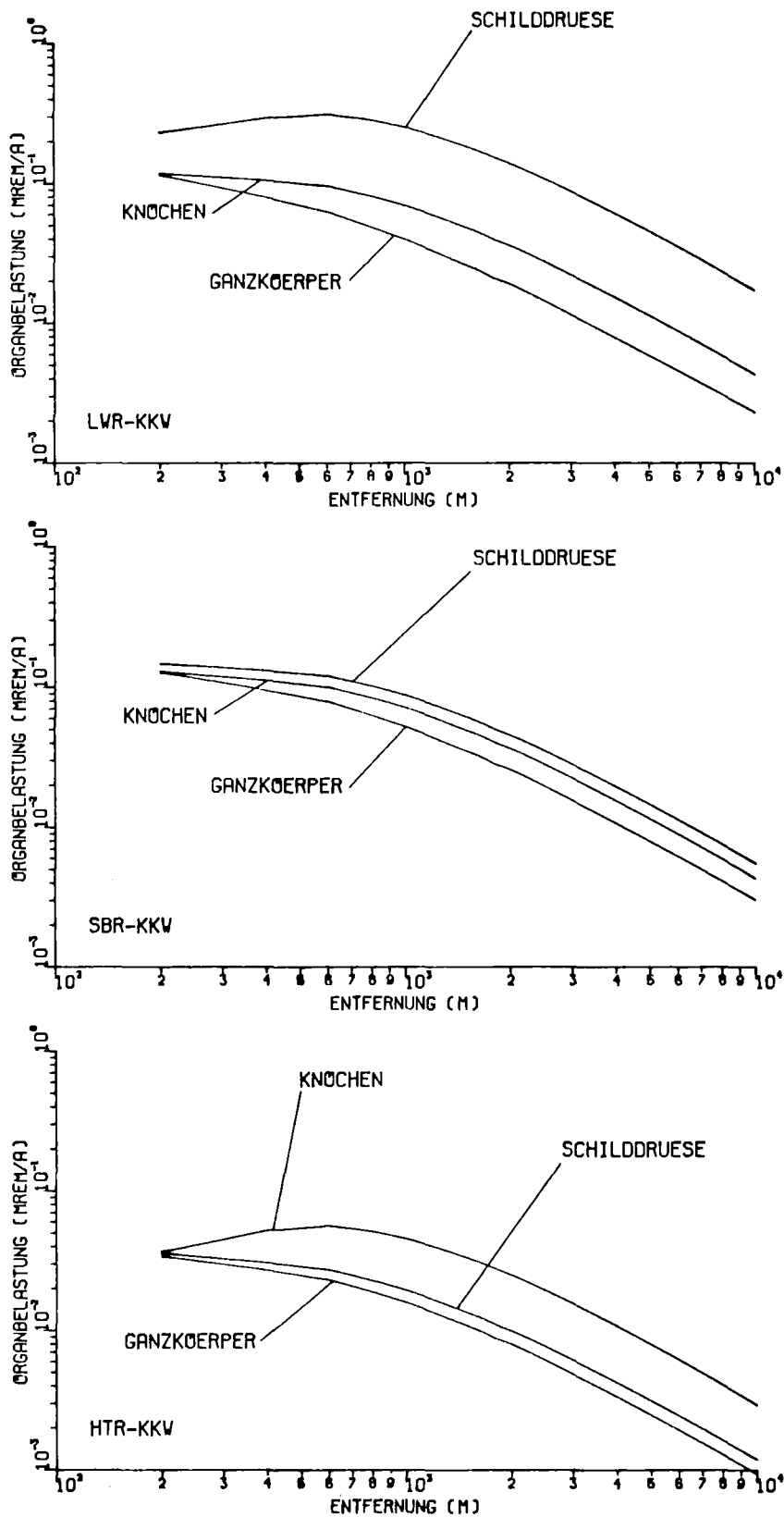


Abb. IV-2: Organspezifische Strahlenbelastung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Emissionsquelle für die Reaktortypen LWR, SBR und HTR bei  $1000 \text{ MW}_e$  installierter Leistung



Reaktortypen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Emissionsquelle. Es werden dabei die Belastungen in der Hauptwindrichtung - für den betrachteten Modellstandort ist dies die West-Ost-Richtung - bis zu 10 km Entfernung dargestellt. Für alle drei Reaktortypen ist der starke Abfall des Belastungsverlaufs mit wachsender Entfernung von der Emissionsquelle erkennbar: Nach 10 km Entfernung sind die Belastungswerte in allen Fällen um mehr als eine Größenordnung geringer als die Werte in unmittelbarer Umgebung der Kraftwerke. Der monotone Abfall der meisten Kurven wird durch die  $\gamma$ -Submersion bestimmt, die von der Emissionsquelle beginnend abfällt. Nur bei der Schilddrüsenbelastung durch den LWR und der Knochenbelastung durch den HTR wird der größte Belastungsanteil durch den Ingestionspfad verursacht. Die Unterschiede der Strahlenbelastungen zwischen den Reaktoren LWR und SBR sind, abgesehen von der höheren Schilddrüsenbelastung durch den LWR, sehr gering. Für den HTR ergeben sich die günstigsten Werte. Bei der mehrfach erwähnten Unsicherheit bezüglich der Emissionsdaten sollte dieser Vergleich allerdings nicht überbewertet werden. Insgesamt kann jedoch gesagt werden, daß nach dem jetzigen Planungsstand und den vorliegenden Kenntnissen die fortgeschrittenen Reaktortypen bei Normalbetrieb ähnliche Werte für die Umweltbelastung erbringen werden wie der LWR, wenn nicht sogar günstigere.

Für besonders ungünstige Verhältnisse werden für den LWR die organspezifischen Strahlenbelastungen durch Abluft- und Abwasseremissionen, getrennt nach Expositionspfaden, detailliert aufgezeigt (Tab. IV-4). Bei den Abluftemissionen werden dabei die Belastungswerte am Ort maximaler Immission im 200 x 200 m-Raster betrachtet. Bei den Abwasseremissionen wird von den bereits erwähnten konservativen Annahmen bezüglich Abwassermenge und Verdünnung ausgegangen. Die Strahlenbelastungen sowohl durch Abluft- als auch durch Abwasseremissionen eines 1000 MW<sub>e</sub>-LWR liegen für alle Organe, außer für die Schilddrüse, unterhalb 0,1 mrem/a (Tab. IV-4). Bei den Abluftemissionen führen die Expositionspfade Ingestion von Radionukliden und  $\gamma$ -Submersion zu den relativ höchsten Belastungswerten. Die  $\beta$ -Submersion,

Tabelle IV-4: Organspezifische Strahlenbelastung durch Emissionen eines 1000 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerkes (LWR) in der unmittelbaren Umgebung der Anlage bei Annahme ungünstiger Voraussetzungen

EXPOSIT.- PFAD	ORGANBELASTUNG (MREM/A) <sup>+</sup>							
	KNOCHEN	LEBER	GANZ- KORPER	SCHILD- DRUESE	NIERE	LUNGE	MAGEN- DARM	HAUT
ABLUF								
BETA -SUBM.	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.30E-02
GAMMA-SUBM.	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02	3.31E-02
GAMMA-BCDEN	2.78E-03	2.78E-03	2.78E-03	2.78E-03	2.78E-03	2.78E-03	2.78E-03	2.78E-03
INHALATION	1.09E-03	3.63E-04	3.57E-04	4.63E-03	3.51E-04	5.73E-04	4.12E-04	3.57E-04
INGESTION	4.30E-02	9.54E-03	8.38E-03	2.52E-01	8.29E-03	8.04E-03	1.22E-02	8.38E-03
SUMME:	8.00E-02	4.58E-02	4.46E-02	2.93E-01	4.45E-02	4.45E-02	4.85E-02	6.76E-02

EXPOSIT.- PFAD	ORGANBELASTUNG (MREM/A) <sup>+</sup>							
	KNOCHEN	LEBER	GANZ- KORPER	SCHILD- DRUESE	NIERE	LUNGE	MAGEN- DARM	HAUT
ABWASSER								
TRINKWASSER	1.45E-02	4.48E-03	5.05E-03	1.44E-02	3.73E-03	3.61E-03	4.76E-03	5.05E-03
FISCHVER.	1.80E-03	1.46E-03	5.50E-04	2.00E-03	3.67E-04	1.45E-04	5.84E-04	5.50E-04
MILCH	2.56E-03	2.09E-03	1.61E-03	6.48E-03	1.26E-03	1.21E-03	1.53E-03	1.61E-03
FLEISCH	1.24E-03	1.15E-03	1.12E-03	2.02E-03	9.78E-04	9.68E-04	1.41E-03	1.12E-03
PFLANZEN	7.68E-02	2.93E-03	9.27E-03	6.45E-03	2.10E-03	1.97E-03	3.38E-03	9.27E-03
SUMME:	9.69E-02	1.21E-02	1.76E-02	3.13E-02	8.54E-03	7.91E-03	1.17E-02	1.76E-02

+ ) Der Zahlenwert nach E bezeichnet den Exponenten zur Basis 10, z.B. 1.0E+01= 10

die fast ausschließlich durch Edelgasemissionen (Kr-85, Xe-131, Xe-133) verursacht wird, trägt nur zur Hautbelastung bei.  $\gamma$ -Submersion und  $\gamma$ -Bodenstrahlung ergeben Belastungen für alle Organe, für die  $\gamma$ -Bodenstrahlung wird jedoch nur ein sehr niedriger Wert erhalten. Die Werte für die  $\gamma$ -Submersion werden durch Edelgasemissionen bestimmt, für die  $\gamma$ -Bodenstrahlung sind hauptsächlich die Kobalt- und Caesiumemissionen verantwortlich. Inhalation von Radionukliden ergibt nur einen sehr geringen Belastungsanteil, der durch die Nuklide Tritium und Kohlenstoff-14 (C-14) verursacht wird. Die Belastungswerte durch Ingestion von Radionukliden, die, wie bereits erwähnt, den relativ bedeutendsten Anteil erbringen, werden im Falle der Abluftemission durch C-14 bestimmt; nur für die Schilddrüsenbelastung ist Jod-131 (J-131) dominierend. Im Falle der Abwasseremissionen sind die Nuklide Tritium, Strontium-90 (Sr-90) und Caesium-137 (Cs-137) von vorrangiger Bedeutung, für die Schilddrüse ergibt wiederum J-131 den größten Belastungsanteil. Die relativ hohen Werte über den Expositionspfad Ingestion von Radionukliden aus Abwasseremissionen werden durch Trinkwasseraufnahme, aber auch durch Verzehr von mit kontaminiertem Wasser beregneten Pflanzen, Obst und Blattgemüse erhalten. Die Radionuklide Tritium, Sr-90 und Cs-137 sind dabei von besonderer Bedeutung; für die Schilddrüsenbelastung ist wiederum J-131 dominierend.

Ein Vergleich der Strahlenbelastung bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennstoffe für verschiedene Reaktortypen kann, ähnlich wie der Reaktortypenvergleich selbst, gegenwärtig nur eingeschränkte Aussagekraft haben. Die reaktortypischen Nuklidspektren der abgebrannten Brennelemente liegen zwar in hinreichender Genauigkeit vor, der endgültig erreichbare Stand der Emissionsrückhaltung in einer großtechnischen Wiederaufarbeitungsanlage kann jedoch vorerst nur mit einer gewissen Schwankungsbreite angegeben werden. Für die Rückhaltung der Aerosolemmissionen mit der Abluft wurden daher, wie beschrieben, zwei unterschiedliche Annahmen gemacht: Fall 1 geht von konservativen Annahmen für die erreichbare Aerosolrückhaltung aus, Fall 2 von einer fortgeschrittenen Rückhaltetechnik.

Um vergleichbare Werte für die verschiedenen Wiederaufarbeitungsanlagen zu haben, wurden die Durchsätze aller Anlagen auf die 1400-jato-LWR-Wiederaufarbeitungsanlage bezogen. Abb. IV-3 zeigt den Verlauf der Strahlenbelastung aus Emissionen der betrachteten reaktortypischen Wiederaufarbeitungsanlagen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Emissionsquelle für die Knochen, die Schilddrüse, die Haut und den Ganzkörper. Es wird dabei von konservativer Rückhaltetechnik für die Aerosolemissionen (Fall 1) und von einer Kühlzeit der Brennelemente von 365 Tagen ausgegangen. Für die HTR-Anlage wird der Emissionsdatensatz bei 57 000 MWd/t SM Abbrand zugrundegelegt. Die Belastungen werden wiederum in der Hauptwindrichtung - für den betrachteten Modellstandort ist dies die West-Ost-Richtung - bis zu 10 km dargestellt. Die Belastungswerte liegen insgesamt um etwa zwei Größenordnungen höher als bei den Reaktoren. Der Abfall der Belastungswerte mit wachsender Entfernung von der Emissionsquelle ist nicht so ausgeprägt wie bei den Reaktoren, da bei den Wiederaufarbeitungsanlagen der Belastungsanteil durch  $\gamma$ -Submersion von untergeordneter Bedeutung ist.

Bei allen Anlagentypen besteht eine deutliche Differenz zwischen den Belastungswerten für Knochen und Schilddrüse, die in etwa 1500 m Entfernung von der Quelle zwischen 30 bis 40 mrem/a liegen, und dem schwächer belasteten Ganzkörper und den anderen Organen, bei denen sich, wiederum in 1500 m Entfernung, Werte unter 10 mrem/a ergeben. Die gemeinsamen Strukturmerkmale sind damit deutlicher als die Unterschiede zwischen den verschiedenen Anlagen. In allen Fällen führen die Expositionspfade Ingestion und Inhalation von Radionukliden zu den relativ höchsten Belastungswerten. Die Werte für  $\gamma$ -Submersion und  $\gamma$ -Bodenstrahlung sind demgegenüber fast vernachlässigbar. Die  $\beta$ -Submersion, die, wie bereits erwähnt, nur zur Hautbelastung beiträgt, wird fast ausschließlich durch Krypton-85 (Kr-85)-Emissionen bestimmt. Die Belastung durch Ingestion von Radionukliden resultiert im wesentlichen aus Tritium- und Kohlenstoff-14 (C-14)-Emissionen; die Nuklide Strontium-90 (Sr-90), Ruthen-106 (Ru-106), Jod-129 (J-129), Caesium-134 (Cs-134) und Caesium-137 (Cs-137) sind ebenfalls von Bedeutung. Der hohe Wert für die Schilddrüsenbelastung wird fast ausschließlich durch die Jod-129 (J-129)-Emission über den Expositionspfad Ingestion verursacht.

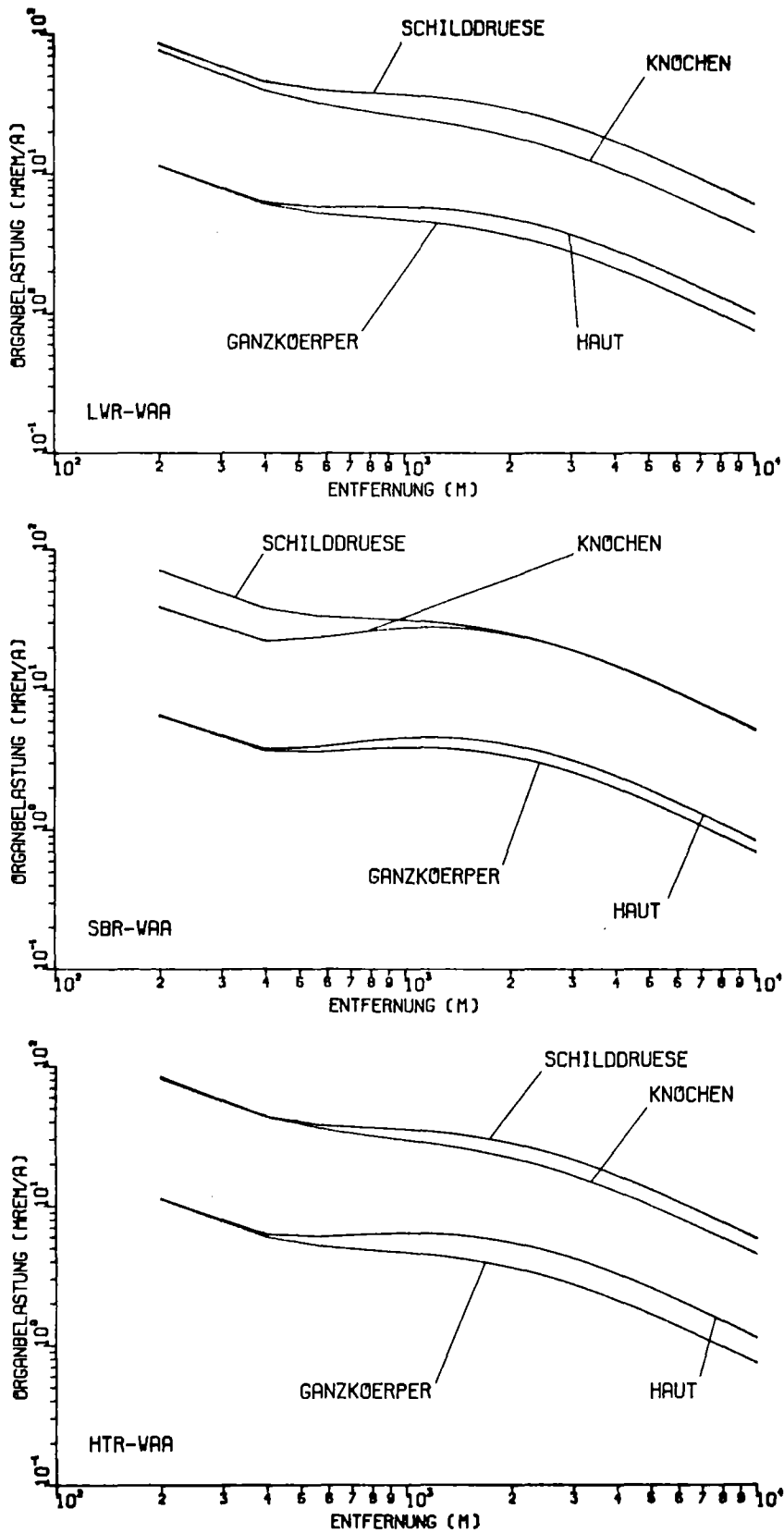


Abb. IV-3: Organspezifische Strahlenbelastung in Abhängigkeit von der Entfernung zu den reaktortypischen Wiederaufarbeitungsanlagen für LWR-, SBR- und HTR-Brennelemente. Die Durchsätze der Anlagen entsprechen der Energieerzeugung aus 1400-jato-LWR-Brennstoff.

Ein Einzelvergleich der Teilkörperbelastungsverläufe zeigt die geringen Unterschiede zwischen den reaktorspezifischen Wiederaufarbeitungsanlagen. LWR- und HTR-Anlagen zeigen eine fast identische Belastungsstruktur; die Werte für Knochen- und Hautbelastung sind für die HTR-Anlage etwas höher, die sonstigen Organbelastungen sind etwa gleich. Die höhere Hautbelastung durch  $\beta$ -Submersion wird durch die höheren Krypton-85-Emissionen bei der Wiederaufarbeitung von HTR-Brennstoffen verursacht. Die höheren Werte durch Ingestion von Radionukliden im Vergleich zur LWR-Wiederaufarbeitung werden fast ausschließlich durch die vergleichsweise höheren Kohlenstoff-14-Emissionen erhalten. Bei Rechnungen mit einer Kohlenstoff-14-Rückhaltung von 90 % schneidet die HTR-Wiederaufarbeitungsanlage erheblich günstiger ab als die LWR-Wiederaufarbeitungsanlage.

Zwischen LWR- und SBR-Anlage ergeben sich geringe Unterschiede. So werden bei der Knochenbelastung günstigere Werte für die SBR-Anlage bis zur Entfernung von etwa 1000 m erhalten und ungünstigere für darüber hinausgehende Entfernungen. Die Knochenbelastung wird bei der LWR-Anlage im wesentlichen durch Ingestion von Strontium-90 verursacht, bei der SBR-Anlage durch Inhalation von Plutoniumaerosolen. Diese unterschiedlichen Expositionspfade führen zu unterschiedlichen ortsabhängigen Belastungsstrukturen. Bei der Ganzkörperbelastung ergeben sich für die SBR-Anlage über die gesamte betrachtete Distanz geringere Werte. Die höheren Strontium-90- und Caesium-134-Emissionen der LWR-Anlage bedeuten damit für den Ganzkörper radiologisch einen größeren Effekt als die Plutonium-Emissionen der SBR-Anlage. Günstigere Verläufe für den SBR ergeben sich auch für die Schilddrüse und die Haut, verursacht durch die geringeren Jod-129- und Krypton-85-Emissionen. Ungünstigere Werte für die SBR-Anlage erhält man außer für die bereits behandelte Knochenbelastung auch für die Belastung der Lunge, der Niere und des Magen-Darm-Trakts. Die höhere Belastung des Magen-Darm-Trakts wird fast ausschließlich durch Ingestion des Nuklids Ruthen-106 verursacht.

Die gezeigten geringen Unterschiede zwischen LWR- und SBR-Wiederaufarbeitungsanlage beruhen im wesentlichen auf der erhöhten Plutoniumemission der SBR-Anlage im Vergleich zur LWR-Anlage. Die Wirkung dieser erhöhten Plutoniumemission wird durch die höheren Spaltprodukt-Emissionen der LWR-Anlage weitgehend ausgeglichen. So kompensiert bei der Knochenbelastung die Strontium-90-Emission die Plutoniumemissionen. Dieser Ausgleichseffekt tritt jedoch nur während der Laufzeit der Anlagen von etwa 50 Jahren auf. Strontium-90 hat eine Halbwertszeit von 28 Jahren, Plutonium-239 eine Halbwertszeit von 24 000 Jahren; diese Zahlen zeigen, daß im zweiten Fall ein Langzeitproblem vorliegt. Der Langzeitaspekt des Plutoniums macht Untersuchungen über eine langfristige Anreicherung im regionalen und globalen Bereich notwendig.

Für den Ort maximaler Immission in der Umgebung der Anlagen werden die organspezifischen Strahlenbelastungen durch die Abluftemissionen der LWR-Wiederaufarbeitungsanlage näher untersucht (Tab. IV-5). Die einzelnen Expositionspfade werden mit ihren Belastungsanteilen für die Fälle konservativer Rückhaltetechnik (Fall 1) und fortgeschrittene Rückhaltetechnik (Fall 2) dargestellt. Eine um den Faktor 10 verbesserte Aerosolrückhaltung (Fall 2 gegenüber Fall 1) ergibt eine Verringerung der Strahlenbelastung um etwa die Hälfte, d.h. von etwa 4-7 mrem/a auf etwa 2-3 mrem/a, ausgenommen für die Knochen und die Schilddrüse. Bei der Knochenbelastung reduziert sich die Belastung im Fall 2 gegenüber Fall 1 um etwa 80 %, d.h. von etwa 24 auf etwa 4 mrem/a, verursacht durch die geringere Belastung über den Expositionspfad "Inhalation von Plutoniumaerosolen".

Weiterhin wurde untersucht, welche Unterschiede sich aufgrund einer Variation der Kühlzeiten der Brennelemente (180, 365 und 3650 Tage) in den Organbelastungen durch die Emissionen bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente der hier betrachteten Reaktortypen ergeben würden. Der Belastungsunterschied zwischen 180 und 365 Tagen Kühlzeit der Brennelemente ist - mit Ausnahme der Magen-Darm-Belastung bei der Wiederaufarbeitung von HTR-Brennstoffen - fast vernachlässig-

Tabelle IV-5: Organspezifische Strahlenbelastung durch Emissionen einer 1400-jährigen Wiederaufarbeitungsanlage für LWR-Brennstoff am Ort maximaler Immission in der Umgebung der Anlage bei konservativer Rückhaltetechnik (Fall 1) und fortgeschrittener Rückhaltetechnik (Fall 2) für Aerosole  
Abbrand 36 000 MWd/t, Anreicherung 3,5 %, Kühlzeit 365 Tage

Fall 1:

EXPOSIT.- PFAD	ORGANBELASTUNG (MREM/A) <sup>+) )</sup>							
	KNOCHEN	LEBER	GANZ- KÖRPER	SCHILD- DRÜSE	NIERE	LUNGE	MAGEN- DARM	HAUT
BETA -SUBM.	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.41E+00
GAMMA-SUBM.	5.59E-02	5.59E-02	5.59E-02	5.59E-02	5.59E-02	5.59E-02	5.59E-02	5.59E-02
GAMMA-BODEN	7.57E-01	7.57E-01	7.57E-01	7.57E-01	7.57E-01	7.57E-01	7.57E-01	7.57E-01
INHALATION	6.25E+00	1.37E+00	7.19E-01	7.47E-01	1.21E+00	3.31E-01	5.06E-01	7.18E-01
INGEST.ABL.	1.67E+01	2.07E+00	3.08E+00	3.45E+01	1.79E+00	1.60E+00	5.72E+00	3.08E+00
SUMME:	2.39E+01	4.26E+00	4.61E+00	3.60E+01	3.61E+00	3.29E+00	7.10E+00	6.02E+00

Fall 2:

EXPOSIT.- PFAD	ORGANBELASTUNG (MREM/A) <sup>+) )</sup>							
	KNOCHEN	LEBER	GANZ- KÖRPER	SCHILD- DRÜSE	NIERE	LUNGE	MAGEN- DARM	HAUT
BETA -SUBM.	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.41E+00
GAMMA-SUBM.	5.57E-02	5.57E-02	5.57E-02	5.57E-02	5.57E-02	5.57E-02	5.57E-02	5.57E-02
GAMMA-BODEN	2.45E-01	2.45E-01	2.45E-01	2.45E-01	2.45E-01	2.45E-01	2.45E-01	2.45E-01
INHALATION	6.66E-01	6.34E-01	5.69E-01	6.07E-01	6.18E-01	5.86E-01	5.54E-01	5.69E-01
INGEST.ABL.	3.31E+00	1.61E+00	1.71E+00	3.43E+01	1.58E+00	1.56E+00	1.96E+00	1.71E+00
SUMME:	4.28E+00	2.54E+00	2.58E+00	3.52E+01	2.50E+00	2.44E+00	2.81E+00	3.98E+00

+) Der Zahlenwert nach E bezeichnet den Exponenten zur Basis 10, z.B. 1.0E+01=10



bar. Ursache der unterschiedlichen Werte für den HTR ist das Nuklid Protactinium-233 (Pa-233) mit einer Halbwertszeit von 27 Tagen. Bei Kühlzeiten der Brennelemente von 3650 Tagen ergibt sich für alle Reaktortypen eine Verringerung der Belastungswerte zwischen etwa 10 und 40 % im Vergleich zu einer Kühlzeit von 365 Tagen. Dies gilt nicht für die Schilddrüsenbelastung durch das langlebige Jod-129 ( $T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^7 \text{a}$ ). Die Belastungsreduktion bei längeren Kühlzeiten ist im Falle erhöhter Aerosolrückhaltung (Fall 2) nicht so ausgeprägt wie im Falle konservativer Rückhaltung (Fall 1). Eine Erhöhung des Abbrandes von HTR-Brennstoffen (95 000 MWd/t SM im Vergleich zu 57 000 MWd/t SM) ergibt, bezogen auf gleiche Energieerzeugung, geringfügig höhere Werte für die Organbelastungen ( $\sim 10 \%$ ).

### 3. Organspezifische Strahlenbelastung durch Radionuklidemissionen aus Kohlekraftwerken

Bei der Energieerzeugung durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen werden außer einer Reihe schädlicher Verbrennungsgase und Feststoffe, wie Schwefeldioxid, Stickoxide und Kohlenmonoxid, auch Radionuklide emittiert, da Kohle stets gewisse Mengen an Uran und Thorium enthält. Die Konzentration liegt meist in der Größenordnung der mittleren Konzentration in der Lithosphäre (bei Uran 2 bis 4 ppm). Entsprechendes gilt für die Zerfallsprodukte, die bis zur Verbrennung der Kohle weitgehend in radioaktivem Gleichgewicht vorliegen. Unter diesen Zerfallsprodukten sind Radium-226 (Ra-226), Radium-228 (Ra-228) und Blei-210 (Pb-210) radiobiologisch am wichtigsten.

Die organspezifischen Strahlenbelastungen durch Radionuklidemissionen von Kohlekraftwerken wurden mit den Belastungsrechnungen für kerntechnische Anlagen zugrundeliegenden Modellen und Ausgangsdaten untersucht.

Bei dem Emissionsdatensatz wird von der theoretischen Annahme ausgegangen, daß radioaktives Gleichgewicht in den betrachteten Uran-238- und Thorium-232-Zerfallsketten vorliegt, d.h. daß keine nuklidspezifischen Anreicherungen in der Flugasche stattfinden /Mc BRIDE, J.P., et al. (1977)/. Als repräsentative Werte für die westdeutsche Steinkohle werden 2 ppm Uran-238- und 4 ppm Thorium-232-Konzentration gewählt. Dies ergibt eine spezifische Aktivität der Nuklide der Uran-238-Zerfallskette von etwa 6 pCi/g Flugasche und der Nuklide der Thorium-232-Zerfallskette von etwa 3,5 pCi/g Flugasche. Zur Berechnung der jährlichen Emissionen wird in allen drei Fällen von folgenden Voraussetzungen ausgegangen: Ein Steinkohlekraftwerk verbrennt je  $\text{GW}_e$  jährlich (Lastfaktor 0,7, Wirkungsgrad 40 %) etwa  $2 \cdot 10^6$  t Kohle, wobei etwa  $1,7 \cdot 10^5$  t Asche entstehen. Moderne elektrostatische Filter begrenzen die Emission von Flugasche aus dem Schornstein auf etwa 1 % der entstandenen Asche, d.h. auf 1700 t/a. Bei den Edelgasen (Radon) wird 100 % -ige Freisetzung angenommen.

Die Emissionen von Kohlekraftwerken sind immer mit der gleichzeitigen Abgabe großer Wärmemengen ( $\sim 5\%$  der Kraftwerksleistung) verbunden. Diese Wärmeemissionen verursachen einen thermischen Auftrieb der Rauchfahne, der in den Ausbreitungsrechnungen durch die sog. Kaminüberhöhung, d.h. einen zusätzlichen Beitrag zur realen Kaminhöhe, berücksichtigt wird. Um den Einfluß dieses Faktors aufzuzeigen, wurden daher bei den Rechnungen zur organspezifischen Strahlenbelastung vier Fälle unterschieden:

- (1) Emissionshöhe 100 m ohne Berücksichtigung der Kaminüberhöhung
- (2) Emissionshöhe 100 m mit Berücksichtigung der Kaminüberhöhung
- (3) Emissionshöhe 200 m ohne Berücksichtigung der Kaminüberhöhung
- (4) Emissionshöhe 200 m mit Berücksichtigung der Kaminüberhöhung.

Die Kaminüberhöhung wurde mit dem Ansatz von /BRIGGS (1969)/ errechnet; dabei wird von einer Wärmeabgabe über einen Einzelkamin von 7,5 MW ausgegangen. Abb. IV-4 zeigt die Strahlenbelastung in der Umgebung des Kraftwerkes für Knochen und Ganzkörper. Der Unterschied zwischen den Belastungswerten bei "200 m Kamin mit thermischem Auftrieb" und "100 m Kamin ohne thermischen Auftrieb" beträgt bei etwa 1000 m Quellentfernung fast eine Größenordnung. Für noch größere Entfernungen wird der Belastungsunterschied geringer. Nur im Fall "100 m Kamin ohne thermischen Auftrieb" ist das durch das Immissionsmaximum bestimmte Belastungsmaximum erkennbar. Der Anstieg des Belastungsverlaufs bei quellnahen Entfernungen wird in erster Linie durch Ausregnen von Radionukliden (Washout) bestimmt. Aus dem Belastungsverlauf für "200 m Kaminhöhe ohne Überhöhung" und "100 m Kaminhöhe mit Überhöhung" läßt sich der Einfluß der Kaminüberhöhung deutlich ersehen. Da beide Verläufe sehr dicht zusammenliegen, entspricht die Kaminüberhöhung bei den gewählten Annahmen in etwa einem Wert von 100 m zusätzlicher Kaminhöhe.

Für den Ort maximaler Immission wird die Strahlenbelastung über die einzelnen Expositionspfade detailliert untersucht. Die Tab. IV-6 zeigt die Beiträge der einzelnen Pfade. Es werden dabei beide Kaminhöhen (100 m und 200 m) unter Berücksichtigung der Kaminüberhöhung betrachtet. Für größere Kraftwerkseinheiten ist die Annahme einer Kaminhöhe von 200 m angebracht. Für den 100-m-Kamin liegt der betrachtete Aufpunkt in 1800 m und für den 200-m-Kamin in 3200 m Entfernung von der Quelle. Der Hauptbelastungsanteil wird in allen Fällen über die Expositionspfade Ingestion und Inhalation erhalten.  $\beta$ -Submersion und  $\gamma$ -Submersion liefern vernachlässigbare Anteile. Auch die  $\gamma$ -Bodenstrahlung liefert einen sehr geringen Beitrag. Die Belastung der Ingestion wird in allen Fällen durch die Nuklide Radium-226 (Ra-226), Radium-228 (Ra-228) und Blei-210 (Pb-210) bestimmt. Bei der Belastung über Inhalation tritt der Einfluß der Thoriumisotope (Th-228, Th-230, Th-232) hinzu.

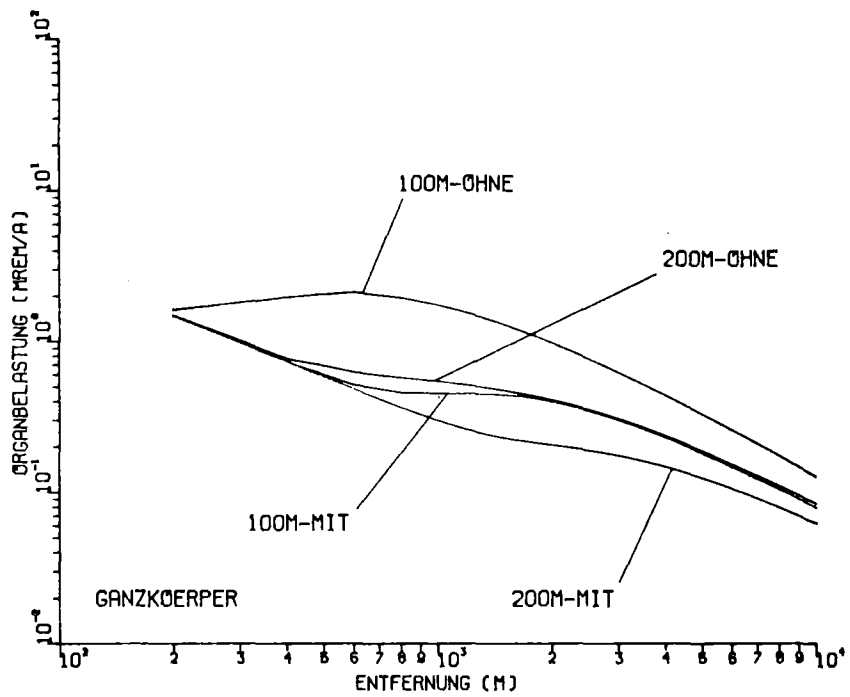
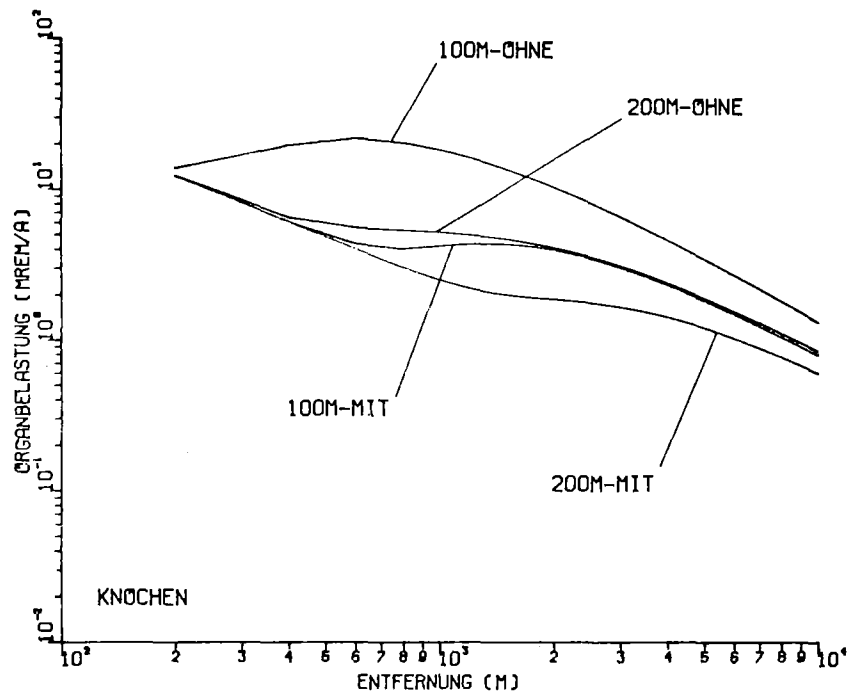


Abb. IV-4: Strahlenbelastung für Knochen und Ganzkörper in Abhängigkeit von der Entfernung zur Emissionsquelle für ein  $1000 \text{ MW}_e$ -Kohlekraftwerk. Vergleich verschiedener Emissionshöhen mit thermischem Auftrieb und ohne thermischen Auftrieb.

Tabelle IV-6: Organspezifische Strahlenbelastung durch Emissionen eines 1000 MW<sub>e</sub> Kohlekraftwerks am Ort maximaler Immission für Fall 1 "100-m-Kamin unter Berücksichtigung des Auftriebs" und Fall 2 "200-m-Kamin unter Berücksichtigung des Auftriebs"

Fall 1:

EXPOSIT.- PFAD ABLUFT	ORGANBELASTUNG (MREM/A)							
	KNOCHEN	LEBER	GANZ- KOERPER	SCHILD- DRUESE	NIERE	LUNGE	MAGEN- DARM	HAUT
BETA-SUBM.	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.66E-07
GAMMA-SUBM.	5.40E-07	5.40E-07	5.40E-07	5.40E-07	5.40E-07	5.40E-07	5.40E-07	5.40E-07
GAMMA-BODEN	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03
INHALATION	3.07E-01	3.86E-02	2.54E-02	2.54E-02	5.27E-01	1.47E-01	1.24E-03	2.54E-02
INGESTION	3.28E+00	3.74E-01	3.85E-01	3.85E-01	4.53E-01	3.85E-01	3.78E-02	3.35E-01
SUMME:	4.09E+00	4.16E-01	4.14E-01	4.14E-01	9.83E-01	5.36E-01	4.26E-02	4.14E-01

Fall 2:

EXPOSIT.- PFAD ABLUFT	ORGANBELASTUNG (MREM/A)							
	KNOCHEN	LEBER	GANZ- KGERPER	SCHILD- DRUESE	NIERE	LUNGE	MAGEN- DARM	HAUT
BETA-SUBM.	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.02E-08
GAMMA-SUBM.	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07	4.12E-07
GAMMA-BODEN	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03
INHALATION	2.48E-01	1.19E-02	7.82E-03	7.82E-03	1.62E-01	4.52E-02	3.80E-04	7.82E-03
INGESTION	1.36E+00	1.54E-01	1.59E-01	1.59E-01	1.89E-01	1.59E-01	1.55E-02	1.59E-01
SUMME:	1.61E+00	1.68E-01	1.69E-01	1.69E-01	3.53E-01	2.07E-01	1.77E-02	1.69E-01

Die Ergebnisse der Rechnungen zur organspezifischen Strahlenbelastung durch die Emissionen verschiedener Reaktorsysteme und durch die Emissionen von Kohlekraftwerken gestatten einen vorläufigen Belastungsvergleich dieser beiden Energieerzeugungsarten bei Normalbetrieb der Anlagen. Der Vergleich kann nur vorläufig sein, da

- (1) für die Ausgangsdaten der Belastungsrechnungen Unsicherheiten existieren, auf die bereits hingewiesen wurde, und
- (2) bei den kerntechnischen Brennstoffkreisläufen die Belastungsanteile aus Erzgewinnung, Erzaufbereitung, Anreicherung und Brennelementherstellung fehlen. Insbesondere bei der Erzgewinnung und Erzaufbereitung sind Belastungsanteile zu erwarten, die nicht vernachlässigt werden können. Diese Belastungsanteile sind allerdings nur für den LWR-Brennstoffkreislauf ohne Pu-Rezyklierung von besonderer Bedeutung, für den SBR-Brennstoffkreislauf werden sie keinen nennenswerten Beitrag ergeben.

Es soll darüber hinaus noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die Energieerzeugung aus Kohlekraftwerken mit einer ganzen Reihe weiterer Schadstoffemissionen sowie der Emission von Kohlendioxid verbunden ist, die hier nicht untersucht wurden.

Für den hier unternommenen Vergleich wurden die Belastungen aus 1000 MW<sub>e</sub>-Kernkraftwerksleistung bei Berücksichtigung des zugehörigen Wiederaufarbeitungsanteils und aus 1000 MW<sub>e</sub>-Kohlekraftwerksleistung gegenübergestellt. Abb. IV-5 und IV-6 zeigen die Ergebnisse für Knochen und Ganzkörper (Abb. IV-5) und für die Organe Niere und Schilddrüse (Abb. IV-6). Die Emissionen aus Kohlekraftwerken ergeben für alle betrachteten Organe, ausgenommen die Schilddrüse, eine höhere Strahlenbelastung.

Je nach Organ und betrachteter Kaminhöhe des Kohlekraftwerks (100 oder 200 m) liegen die Belastungswerte für Kohlekraftwerke um den Faktor 2 bis 10 höher als die für Kernenergieerzeugung erhaltenen. Nur bei der

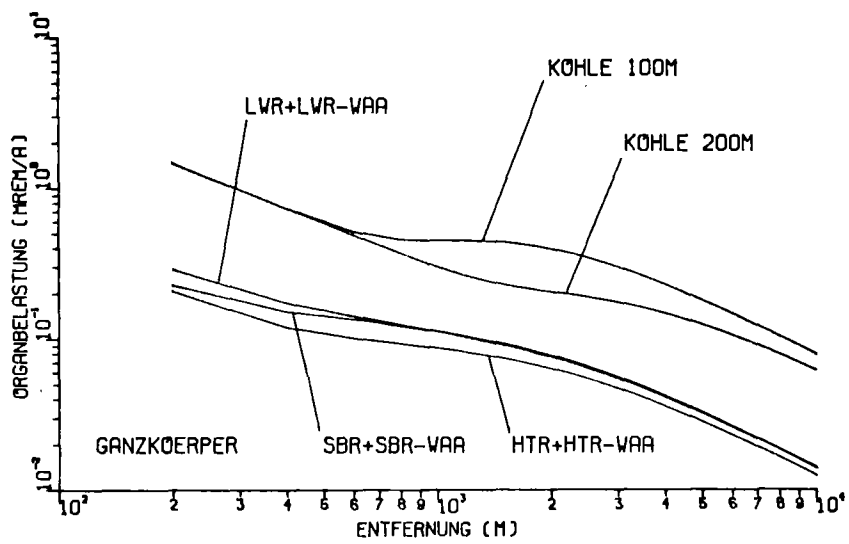
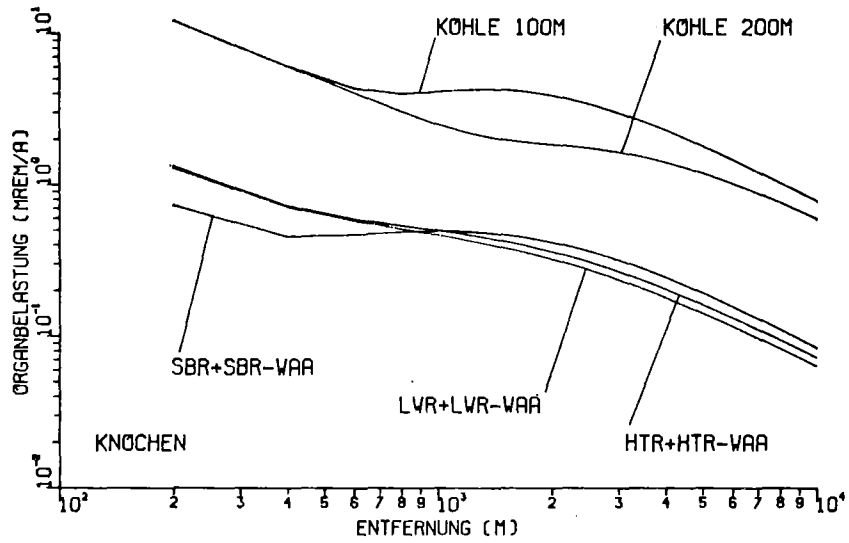


Abb. IV-5: Strahlenbelastung für Knochen und Ganzkörper in Abhängigkeit von der Entfernung zur Emissionsquelle. Vergleich verschiedener Energieerzeugungsalternativen

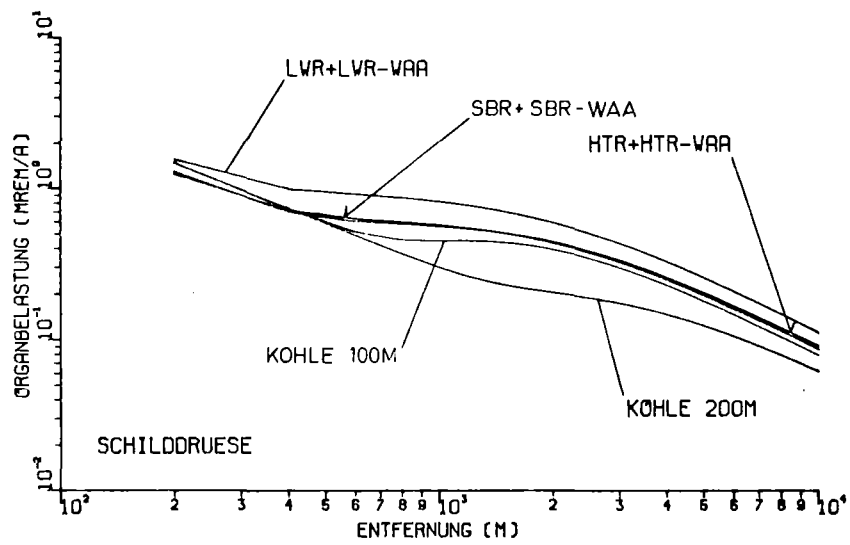
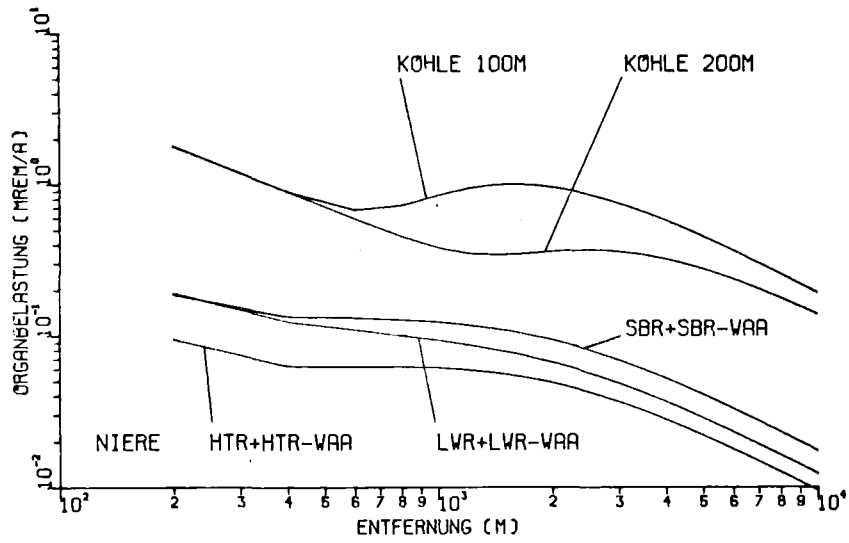


Abb. IV-6: Strahlenbelastung für die Organe Niere und Schilddrüse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Emissionsquelle. Vergleich verschiedener Energieerzeugungsalternativen



Schilddrüsenbelastung führt die Kernenergieerzeugung zu geringfügig höheren Werten als die Energieerzeugung aus Kohlekraftwerken. Hauptexpositionspfad ist in jedem Falle die Ingestion; der relative Anteil dieses Pfades ist dabei im Falle der Kohlekraftwerke noch größer als im Falle der Kernenergieerzeugung.

#### 4. Biologische Strahlenwirkung auf den menschlichen Organismus

Die Strahlenexposition der Bevölkerung durch kerntechnische Anlagen erfolgt überwiegend durch Aufnahme von Radionukliden. Das Verhalten kerntechnischer Radionuklide im Säugetierorganismus ist aus eingehenden tierexperimentellen Untersuchungen und auch aus Erfahrungen beim Menschen bekannt. Die typischen Aufnahmewege, Verteilung und Verweilzeiten der Radionuklide in den Organen können damit für den Menschen vorausgesagt werden. Tab. IV-7 gibt einen Überblick über die Hauptablagerungsorte der Radionuklide; für die häufig diskutierte Transurane sind dies das Skelett und die Leber. Die Hauptablagerungsorgane sind für ein bestimmtes Radionuklid, unabhängig von der untersuchten Tierart, dieselben. Große Unterschiede wurden aber hinsichtlich der Verweildauer einzelner Nuklide und Nuklidverbindungen festgestellt /SEIDEL, A. (1977)/. Als Beispiel ist in Abb. IV-7 die Abhängigkeit der biologischen Halbwertszeit des Caesium-137 vom Körpergewicht verschiedener Tierspezies wiedergegeben. Alle im Skelett deponierten Nuklide besitzen sehr lange biologische Halbwertszeiten (bis zu mehreren Jahren). Was die Lunge betrifft, so ist in Abb. IV-8 als Beispiel die Inhalation von Plutonium (Pu-239) eines der bereits klassischen Experimente mit Beagle-Hunden wiedergegeben. Die biologische Halbwertszeit von Plutonium (Pu-239) in der Lunge der untersuchten Tiere beträgt etwa 3 Jahre.

Tabelle IV-7: Hauptablagerungsorte der Radionuklide

Radionuklid	Hauptablagerungsorte
H-3 (als HT0)	Körperwasser
Kr-85	Strahlenbelastung der Haut (keine chem. Bindung im Organismus)
J-131	Schilddrüse
Sr-90	Skelett
Zr-95	Skelett, Leber, Niere
Nb-95	Skelett, Leber, Niere
Ru-106	Niere, Skelett, Leber
Cs-137	Muskulatur
Lanthaniden	Skelett, Leber
Uran	Niere, Skelett
Transurane	Skelett, Leber
Oxide u.a. biol. unlösl. Formen aller Radionuklide	nach Inhalation: Lunge

Quelle: SEIDEL, A. (1975), SEIDEL, A. (1977)/.

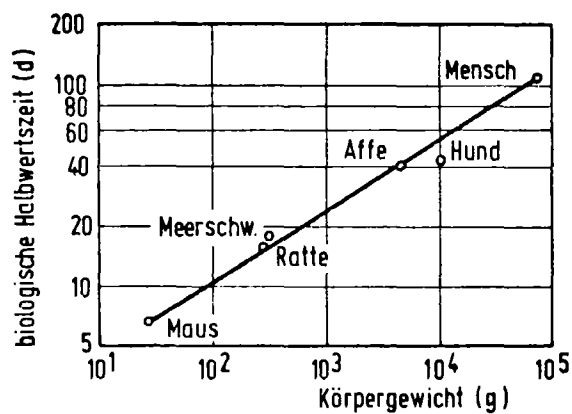


Abb. IV-7: Beziehung zwischen dem Körpergewicht und der biologischen Halbwertszeit von Cs-137 im Ganzkörper verschiedener Tierspezies (Lit. s. /SEIDEL, A. (1977)/)

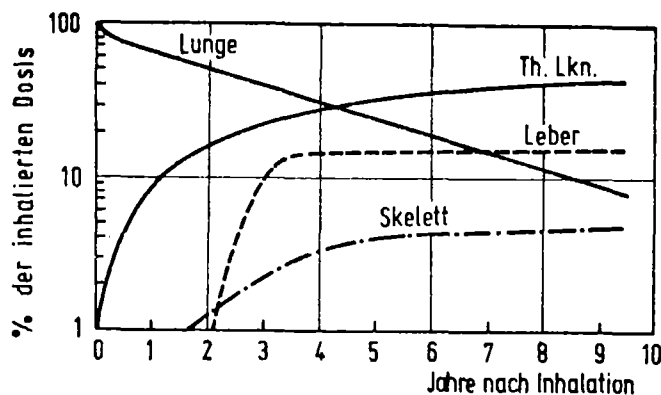


Abb. IV-8: Retention von inhaliertem  $\text{PuO}_2$  (Pu-239) beim Hund /BAIR, W.J., et al. (1973)/ (Th.Lkn.= Lymphknoten im Brustraum)

Die biologischen Strahlenwirkungen auf den menschlichen Organismus führen zu somatischen und genetischen Schäden. Zu den wichtigsten somatischen Spätwirkungen einer Aufnahme von Radionukliden in genügend hoher Dosierung gehört die Entstehung von Tumoren, auf die in Zusammenhang mit den Ausführungen der vorangehenden Kapitel besonders eingegangen werden soll.

Angaben über Art und Anzahl der in einer Population aufgrund von Strahlenwirkungen zusätzlich auftretenden Tumorerkrankungen sind aufgrund von direkten Beobachtungen an Menschen und einer großen Zahl von Tierversuchen möglich. Die in den beobachteten Fällen aufgenommenen Strahlendosen liegen um mehrere Größenordnungen über den maximal zulässigen Grenzwerten für die Strahlenbelastung der Bevölkerung. Die lineare Extrapolation der Dosis-effekt-Beziehung zum Bereich kleiner Strahlendosen wird derzeit als zuverlässigste Möglichkeit angesehen, das Tumorrisiko nicht zu unterschätzen. Von besonderer Bedeutung sind:

- Leukämie
- Osteosarkome
- Lebertumoren
- Lungencarcinome.

Von den bösartigen Erkrankungen als Spätschaden nach Ganzkörperbestrahlung oder auch nur der Bestrahlung des Knochenmarks tritt die Leukämie als früheste Reaktion auf. Mit einer Strahlenbelastung des Knochenmarks ist z.B. nach Aufnahme von Tritium, Caesium-137, Strontium-90 und Protactinium-233 zu rechnen. Bei Annahme einer linearen Beziehung zwischen aufgenommener Strahlendosis und Leukämiehäufigkeit wurden trotz der Unterschiede zwischen den in Betracht gezogenen Populationen übereinstimmend Werte zwischen 20 und 60 Fällen / $10^6$ /rem erhalten. Von Mays und Mitarbeitern /MAYS, C.W., et al. (1973)/ wurden die Daten für die in Nagasaki Überlebenden unter der Annahme einer rein quadratischen Dosis-Häufigkeitsbeziehung analysiert; ihre Schätzungen für das Leukämierisiko ergeben im niedrigen Dosisbereich Werte, die ganz erheblich kleiner sind als bei linearer Extrapolation (0.1 Fall / $10^6$ /rem<sup>2</sup>) (Abb. IV-9).

Zu den am besten bekannten Spätwirkungen inkorporierter Radionuklide gehören jene nach Aufnahme von knochensuchenden Nukliden. Dies erklärt sich einerseits aus der Tatsache, daß sich wichtige Spaltprodukte sowie die Actiniden neben der Leber hauptsächlich im Skelett ablagern; andererseits sind die Spätfolgen einer Inkorporation von knochensuchenden Alphastrahlern seit einigen Jahrzehnten auch beim Menschen bekannt, so daß quantitative Vergleiche zwischen tierexperimentellen Ergebnissen und Daten beim Menschen angestrebt werden können. Knochensuchende Radionuklide wie Strontium-90, Ce-144, Ra-226, Uran-233 sowie die Transurane rufen u.a. bösartige Tumoren des knochenbildenden Gewebes (Osteosarkome) hervor, wie auch bei verschiedenen Versuchstierarten gezeigt werden konnte. Ausgehend von einer linearen Dosis-Effekt-Beziehung für die Osteosarkom-Induktion beim Menschen liegt die Schätzung für das Osteosarkomrisiko nach Inkorporation oberflächensuchender Alphastrahler bei etwa 20 Fällen / $10^6$ /rem.

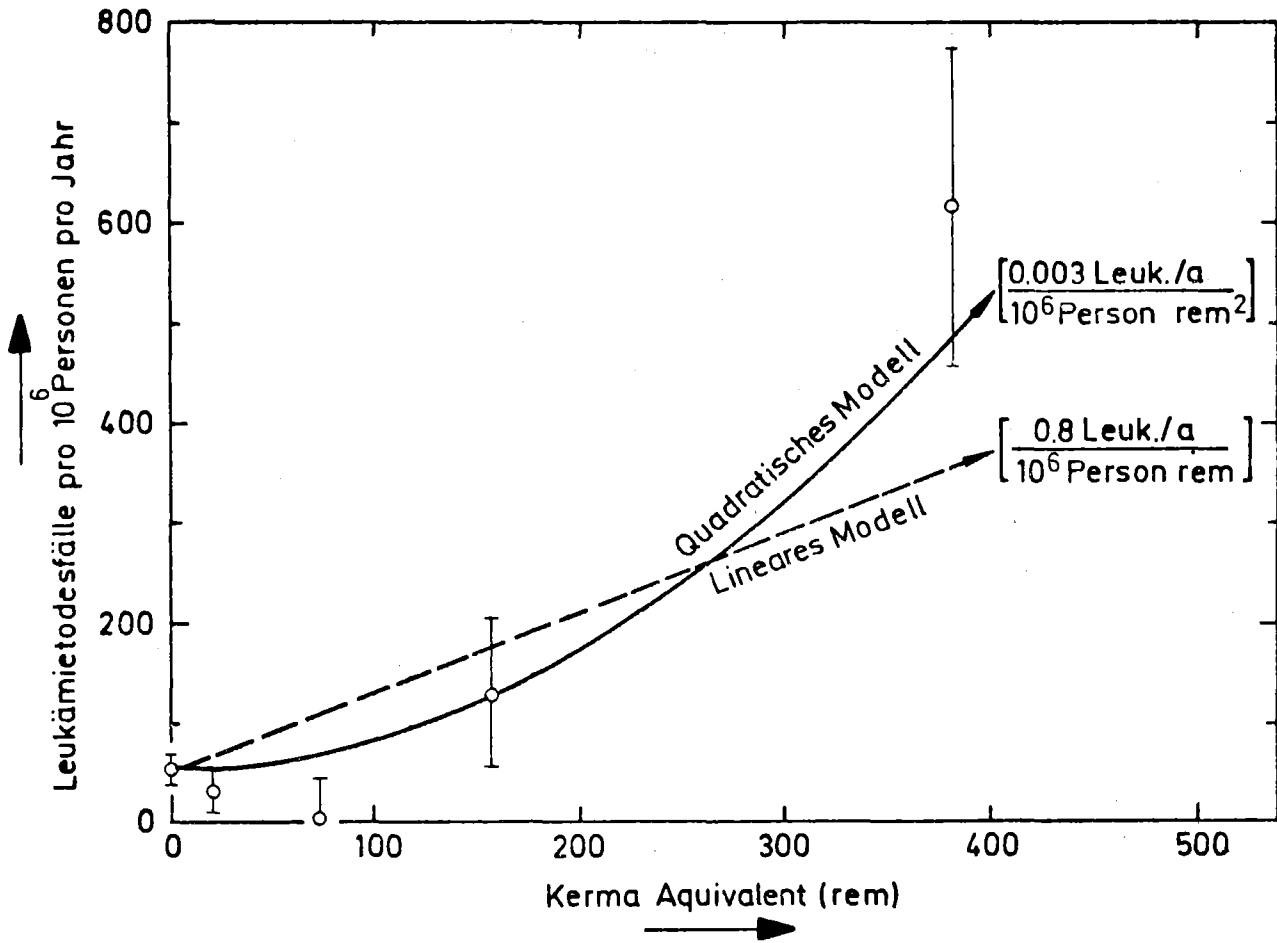


Abb. IV-9: Leukämiehäufigkeit in Nagasaki; Anpassung eines linearen oder quadratischen Modells zur Beschreibung des Einflusses der Strahlendosis /MAYS, C.W., et al. (1973)/

Ausgangspunkt für Schätzungen des Carcinomrisikos nach Bestrahlung der Lunge sind tierexperimentelle Daten nach Inhalation von Transuranelementen sowie u.a. die Fälle von Lungenkrebs bei Bergarbeitern, Thorotrast-Patienten und Atombomben-Überlebenden gewesen. Auswertungen tierexperimenteller Daten nach Inhalation von Transuranelementen bei Ratten ergeben bei Annahme einer linearen Dosis-Effekt-Beziehung ohne Schwellenwert einen Schätzwert für die Häufigkeit strahleninduzierter Lungencarcinome von 80 bzw. 160 Fällen /10<sup>6</sup>/rem für lösliche bzw. unlösliche Transurane /BAIR, W.J., THOMAS, J.M. (1976)/. Im Zusammenhang mit der Diskussion um

die gelegentlich behauptete sehr hohe Toxizität von sog. "heißen Teilchen" ist der nur geringe Unterschied bemerkenswert.

Nach einer Ganzkörperbestrahlung entstehen nach entsprechend hoher Dosisbelastung zunächst Leukämien, später aber in zunehmender Häufigkeit auch Tumoren der Lunge, Schilddrüse und Brustdrüse. Weitere Grundlagen für die Schätzung des Risikos für Schilddrüsen- und Brustdrüsentumoren stellen Fälle nach Aufnahme von Jod-131 bzw. Teilkörperbestrahlung der entsprechenden Körperregionen dar. Das Gesamtrisiko für Tumortodesfälle einschließlich Leukämie nach einer Ganzkörperbestrahlung wird auf 100 Fälle / $10^6$ /rem geschätzt /ICRP (1977), MAYS, C.W., et al. (1973), UNSCEAR (1977)/. Auch bei diesem Wert ist darauf hinzuweisen, daß er erstens unter Annahme einer linearen Dosiseffektbeziehung und zweitens ausgehend von Bestrahlung mit hoher Dosisrate errechnet wurde. Überlegungen hinsichtlich des tatsächlichen Risikos, die die geringere Wirksamkeit einer Strahlendosis bei kleiner Dosisrate berücksichtigen und die Möglichkeit, daß die Dosiseffektbeziehung linear-quadratisch oder quadratisch ist, führten für Beta- oder Gammastrahlung zu wesentlich niedrigeren Schätzwerten /MAYS, C.W., et al. (1973)/.

Abschließend sei zum Problem der biologischen Risikoschätzungen darauf verwiesen, daß für Strahlenschutzüberlegungen nach Meinung aller zuständigen Gremien und Fachleute derzeit mehr Gründe für als gegen die Richtigkeit der Annahme einer linearen Dosiswirkungsbeziehung sprechen; hiervon wird im folgenden ausgegangen. Die praktische Bedeutung der bisher genannten Zahlen wird verständlicher, wenn man sie zur Anzahl der spontan auftretenden Tumortodesfälle in bezug setzt, die bei ca. 20 % der Gesamtsterblichkeit liegt (also  $200\ 000/10^6$ ); dies ist in Abb. IV-10 am Beispiel des Gesamttumorrisikos (einschließlich Leukämie) nach Ganzkörperbestrahlung ( $100/10^6$ /rem) geschehen. Hiernach ist beispielsweise bei einer zusätzlichen Ganzkörper-Strahlenbelastung von 1 mrem/a, d.h. 30 mrem pro Generation, eine Zunahme der Sterblichkeit an Tumoren um maximal  $\sim 10^{-3}$  % (der normalen Tumorsterblichkeit) zu erwarten; das entspräche z.B. 200 002 statt

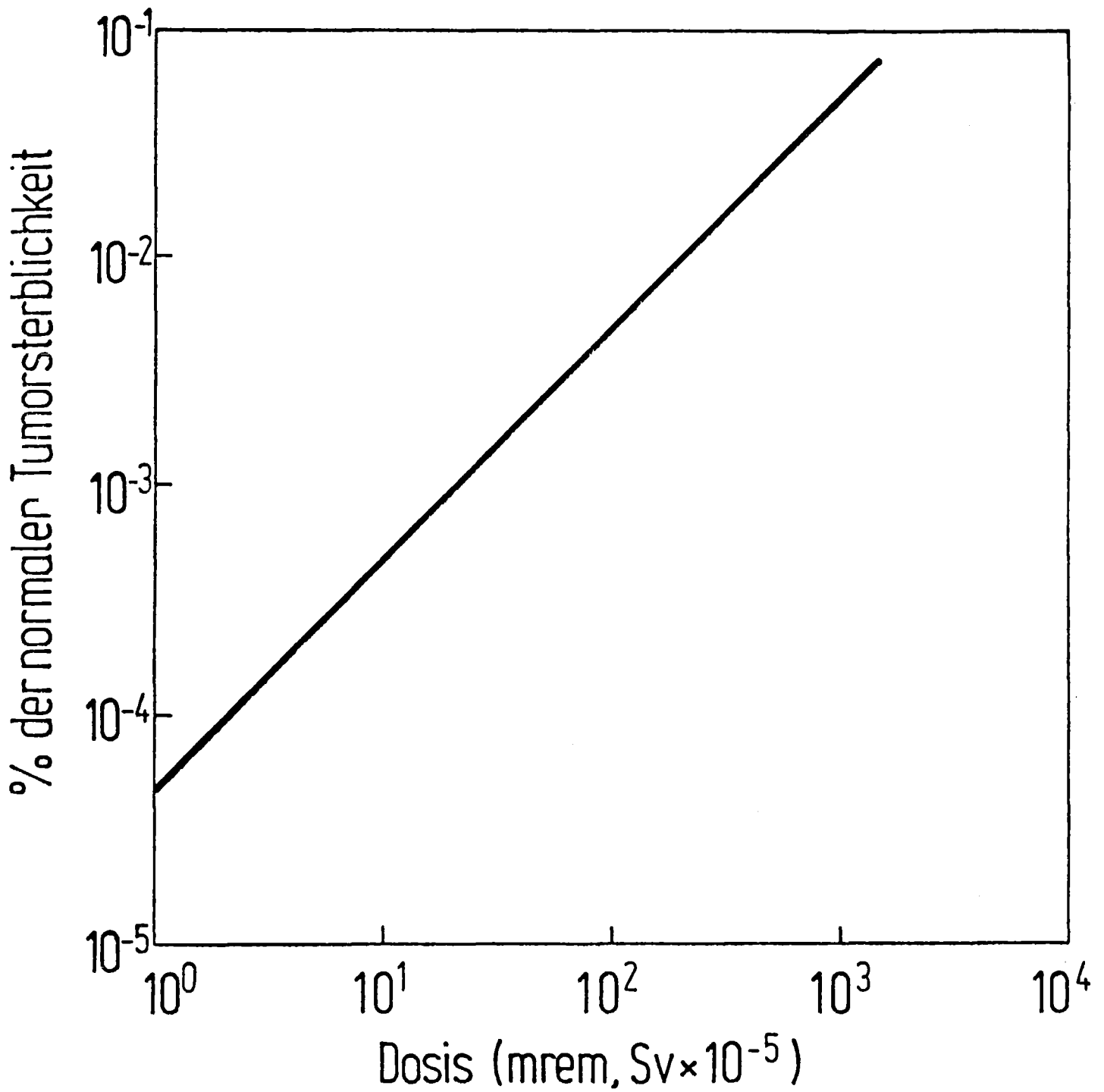


Abb. IV-10: Maximaler Prozentsatz, um den sich die Gesamttumorstorblichkeit durch strahleninduzierte Tumortodesfälle erhöht (Ganzkörperbestrahlung, lineare Extrapolation nach /ICRP (1977)/)

200 000 Fällen/ $10^6$  Todesfällen; dem steht gegenüber, daß z.B. in den letzten 15 Jahren die Tumorsterblichkeit (bezogen auf  $10^6$  analysierte Todesfälle insgesamt) um 20 000 Fälle zugenommen hat.

Ähnliche Überlegungen lassen sich mittels der genannten Werte auch für Lungen- und Skelettumoren anstellen; sie führen z.B. zu dem Schluß, daß sich bei einer Organbelastung von 1 mrem/a ihre Anzahl um weniger als 5 zusätzliche Fälle pro  $10^6$  Todesfälle erhöhen wird. Bei einer Zahl von 34 000 bzw. 2000 spontan vorkommenden Todesfällen an Lungen- bzw. Knochentumoren pro  $10^6$  (Todesfälle insgesamt) entspräche dies weniger als  $10^{-2}$  % der jeweiligen Spontanrate bzw. wiederum ca.  $10^{-3}$  % der genannten Tumorsterblichkeit.

Um die genetischen Risiken einer Strahlenbelastung des Menschen voraus-sagen zu können, müssen tierexperimentelle Daten auf den Menschen über-tragen werden. Im Gegensatz zu den somatischen Strahlenwirkungen, bei denen direkte Beobachtungen am Menschen vorliegen, konnte an den Nach-kommen bestrahlter Personen, z.B. in Nagasaki und Hiroshima, kein strah-lenbedingter genetischer Schaden nachgewiesen werden. Solche Strahlen-schäden sind jedoch aufgrund von Tierversuchen mit höheren Strahlendosen zu erwarten und ihr Ausmaß für kleine Dosen abschätzbar. Bekannte Risikoabschätzungen gehen davon aus, daß die Verdopplungsdosis, d.h. die Dosis, die die natürliche Mutationsfrequenz verdoppelt, bei einer chronischen Strahlenbelastung 100 rad beträgt. Dann besteht bei einer Strahleneinwirkung von 1 rem/Generation die Wahrscheinlichkeit, pro 1 Million Lebendgeborene 20-200 genetische Strahlenschäden zusätzlich zu erhalten. Diesem Wert steht die Gesamtzahl der spontan auftretenden Mutationen gegenüber, die etwa 60 000 Schäden pro 1 Million Lebendgebo-rene beträgt. Die Abschätzung der spontan auftretenden Schäden ist allerdings unsicher, da nur wenige genaue Daten über größere Bevölke-rungsgruppen vorliegen. Vorerst besteht somit keine Möglichkeit, im Rahmen der zulässigen Maximaldosen die Existenz dieser genetischen Strahlenschäden zu erkennen.



## 5. Schlußfolgerungen

- (1) Ein aussagefähiger Vergleich der Umweltauswirkungen verschiedener Reaktorsysteme und Brennstoffkreisläufe bedarf noch spezifischer Datenerhebungen insbesondere zum Emissionsverhalten der fortgeschrittenen Reaktoren. Von besonderem Interesse dürfte ein umfassender Vergleich von Uran-Thorium- und Uran-Plutonium-Kreisläufen und den möglichen Hybridkreisläufen mit thermischen und schnellen Reaktoren sein.
- (2) Legt man die angenommenen Emissionswerte der kritischen Anlagen der untersuchten Brennstoffkreisläufe bei Normalbetrieb zugrunde (Wiederaufarbeitungsanlagen und Reaktoren), so werden auch bei ungünstigen Annahmen die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung für die organspezifischen Strahlenbelastungen eingehalten.
- (3) Bei der Verbrennung von Kohle werden die eingelagerten natürlichen radioaktiven Zerfallsketten frei. Werden die organspezifischen Strahlenbelastungen durch diese Radionuklidemissionen mit den den Belastungsrechnungen für kerntechnische Anlagen zugrundeliegenden Modellen und Datensätzen untersucht, so ergeben sich, bezogen auf gleiche Energieerzeugung, für fast alle Organe, die Knochen und den Ganzkörper Belastungen, die zumindest um den Faktor 2 höher sind als bei der Kernenergieerzeugung, selbst wenn man bei letzterer die Emissionen aus der Wiederaufarbeitung mit berücksichtigt. Nur für die Schilddrüsenbelastung führt die Kernenergieerzeugung zu geringfügig höheren Werten. Bei den Kohlekraftwerken wurde der thermische Auftrieb der Rauchfahne und damit der Nuklidemissionen berücksichtigt.
- (4) Bei den Ergebnissen der radioökologischen Modellrechnungen muß berücksichtigt werden, daß eine Reihe von Eingangsdaten noch in Dis-

kussion sind, wie z.B. die Daten zum Radionuklidtransfer vom Boden zum eßbaren Teil der Pflanze. Für diese Faktoren sind erhebliche standortspezifische Unterschiede erkennbar. Auch das Problem der langfristigen Anreicherung sehr langlebiger Nuklide, wie z.B. der Aktiniden, konnte mit den vorliegenden Modellen nicht untersucht werden.

- (5) Die Strahlenexposition an den ungünstigsten Einwirkungsstellen ergibt keine hinreichende Aussage über das Gesamtrisiko durch nukleare und nichtnukleare Energieerzeugung bei Normalbetrieb. Hierzu ist die Errechnung der sog. Kollektivbelastung in der regionalen und globalen Umwelt notwendig. In künftigen Umweltanalysen muß daher diese Kollektivbelastung stärker berücksichtigt werden.
  
- (6) Bisherige Abschätzungen zeigen, daß die radiologische Belastung der Bevölkerung durch den Normalbetrieb kerntechnischer Anlagen sehr klein gegenüber der natürlichen Strahlenbelastung ist. Somit ergeben sich auch unter ungünstigen Annahmen Schätzwerte für das Risiko der Entstehung zusätzlicher Tumorerkrankungen oder Erbschäden, die im Vergleich zur jeweiligen Spontanrate dieser Erkrankungen äußerst klein sind.

## V. Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie

### 1. Problemaufriß und Aufgabenstellung

Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland besteht darin, daß der im Energieprogramm der Bundesregierung vorgesehene weitere Ausbau der Kernenergie durch Protestaktionen und Einspruchsverfahren verzögert oder behindert wird und dadurch die gesamte Energiepolitik der Bundesregierung in Mißkredit zu geraten droht. Die Frage lautet, inwieweit eine solche Kennzeichnung der Situation zutreffend ist, genauer: Wie ist die Opposition gegen die Kernenergie, die sich vorwiegend außerhalb der Institutionen des politischen Systems formiert, bezüglich ihrer politischen Bedeutung einzuschätzen?

In dieser Analyse wird der Kenntnisstand über Entstehungszusammenhänge und Stabilisierungstendenzen der Kernenergieopposition in geraffter Form soweit dargestellt, wie er zur Beantwortung der obigen Frage relevant erscheint.

### 2. Zur historischen Entwicklung der Kernenergiekontroverse

Die öffentliche Meinung zur Kernenergie war in der ersten Phase der Technologieentwicklung weitgehend positiv. Vereinzelt Einsprüche, etwa von Anliegergemeinden nuklearer Anlagen, blieben ohne öffentliche Resonanz. Erst zu Beginn der 70er Jahre, als die Implementationsphase der Technologie begann, trat anläßlich von Standortentscheidungen für Kernkraftwerke eine stärkere Ablehnung zutage. Es bildeten sich lokale und regionale Bürgerinitiativen und "Aktionsgemeinschaften" gegen das jeweilige Kernkraftwerksprojekt, die zusammen mit bundesweiten Naturschutzverbänden im Rahmen der Genehmigungsverfahren massenhafte Sammeleinsprüche initiierten. Vertreter von Bürgerinitiativen traten in den Anhörungsterminen als

Beschwerdeführer auf, wobei die Argumente nicht nur projektspezifisch, sondern auch generell auf Risiken und Umwelteinflüsse dieser Technologie bezogen waren. Daneben wurden Anfechtungsklagen gegen Teilerrichtungsgenehmigungen erhoben, wobei auch Gemeinden als Kläger auftraten. Die Forderung nach einer aufschiebenden Wirkung der Anfechtungsklagen auf die sofortige Vollziehbarkeit der Teilerrichtungsgenehmigungen wurde im allgemeinen abschlägig beschieden.

Diese Erfahrung zusammen mit einer als ungenügend empfundenen Verfahrensweise bei den Erörterungsterminen machte unter den protestierenden Bürgern die These einer Koalition von Wirtschaft, Wissenschaft, Administration und Gerichtsbarkeit populär, die auf dem Verfahrenswege nicht zu durchbrechen sei. In mehreren Orten wurden Protestaktionen veranstaltet, die 1975 in Wyhl auf spektakuläre Weise zu Zusammenstößen mit der Polizei und zu einer neunmonatigen Bauplatzbesetzung durch Protestler führten. Eine weitere Steigerung an Vehemenz und Militanz erfuhr der Antikernkraftprotest im November 1976 in Brokdorf, wo allerdings Provokationen durch einen überstürzten Baubeginn und durch übermäßige Polizeieinsätze als mitverursachendes Moment nicht ausgeschlossen werden können. Eine weitere derartige Eskalation blieb bei den nachfolgenden Massendemonstrationen in Brokdorf (Februar 1977), Grohnde (März 1977) und Kalkar (Oktober 1977) aus, obwohl es teilweise wiederum zu militanten Auseinandersetzungen kam.

Diese spektakulären Ereignissen blieben nicht ohne politische Folgen. Eine starke öffentliche Aufmerksamkeit gegenüber der Kerntechnologie und ihren Problemen äußert sich in der vermehrten Behandlung des Themas in den Massenmedien, in Resolutionen von Jugendorganisationen und Basisgruppen der politischen Parteien sowie in kritischen Stellungnahmen von Persönlichkeiten der Politik, der Kirchen und der Wissenschaft. In diesem Klima gewannen die Bürgerinitiativen und ihre überregionalen Dachorganisationen politische Legitimität. Die Lösung des Problems der Endlagerung radio-

aktiver Abfälle wurde zum Kriterium für weitere Standortgenehmigungen, woraus de facto ein Genehmigungsstopp resultierte. Schließlich wurden die anhängigen Anfechtungsklagen von den Verwaltungsgerichten nicht mehr durchgehend abschlägig beschieden.

Ähnliche Entwicklungen, wenn auch mit unterschiedlicher Ausprägung und Stärke, sind in allen westlichen Industrienationen einschließlich Japans zu verzeichnen, die eigene Nuklearprogramme verfolgen. Durch die internationale Diskussion über die Gefahr einer Weiterverbreitung von Kernwaffen durch die Nukleartechnologie erfährt die weltweit verbreitete antinukleare Kritik weitere Verstärkung.

### 3. Die Risiken der Kernenergie in der öffentlichen Diskussion

Das zentrale Thema in den Auseinandersetzungen um die Kernenergie sind ihre Risiken für Gesundheit und Umwelt. Das legt die populäre und von vielen Erklärungsansätzen verfolgte These nahe, daß die Akzeptanzproblematik eine Reaktion auf die katastrophalen Folgen zwar unwahrscheinlicher, aber möglicher Nuklearunfälle ist. Die aus dieser These resultierenden Widersprüchlichkeiten sind jedoch: Es gibt andere Risiken, die gleiche Reaktionen hervorrufen müßten, so etwa das Risiko der Lagerung von Atomwaffen im Gebiet der Bundesrepublik. Umgekehrt gibt es Akzeptanzprobleme mit ähnlichen Erscheinungen des Bürgerprotests auch in anderen Politikbereichen, in denen ein derartiges Risiko keine Rolle spielt, etwa im Bildungswesen, in der Städteplanung, in der Verkehrsplanung. Solche Hinweise machen eine Modifikation der These notwendig, wie weiter unten dargestellt wird. Im Kontext dieser erweiterten These kommt dem Thema Risiko innerhalb der Auseinandersetzungen eher eine symbolische Funktion zu. Das Risiko bildet den thematischen Fokus der Kontroverse und kann von beiden Konfliktparteien

für die jeweilige Argumentationsrichtung nutzbar gemacht werden. Auf seiten der Befürworter thematisiert es das im Vergleich zu anderen Technologien hohe Sicherheitsniveau der Kerntechnik, und die Förderung der nuklearen Sicherheitsforschung stellt ein Feld staatlicher Aktivität dar, dem ein gewisser legitimatorischer Wert beigemessen werden kann. Auf seiten der Gegner werden dem Thema unter Außerachtlassung der geringen Wahrscheinlichkeiten nuklearer Unfälle dramatische Aspekte abgewonnen, die ein hohes Maß allgemeiner Betroffenheit symbolisieren. Beiden Argumentationen können Schwächen nachgewiesen werden: Das sicherheitstechnische Risiko erweist sich thematisch als zu begrenzt, um die in der öffentlichen Diskussion angesprochenen Risikoaspekte abdecken zu können. Insbesondere versagt es bei der Erfassung von Störungen aufgrund menschlicher Willkür. Die gegnerische Argumentation kann sich dem Vorwurf nicht entziehen, bei der Kernenergie Risiken zu dramatisieren, die in anderen Zusammenhängen akzeptiert sind.

#### 4. Erklärungsansätze für die Akzeptanzproblematik der Kernenergie

Hypothesen über die Entstehungszusammenhänge der Akzeptanzproblematik, die über die Risikoreaktionsthese hinausführen, gaben den Anlaß zu Untersuchungen über psychologische, soziale und sozialstrukturelle Hintergründe, die ein vielschichtiges Bild ergeben. Insbesondere psychologisch und sozialpsychologisch ansetzende Untersuchungen betonen latente Faktoren, die von den gegen die Kernenergie opponierenden Menschen selbst nicht erkannt werden können oder zumindest von ihnen nicht reflektiert werden. Es sind dies die psychischen Mechanismen einer verzerrten Risikoperzeption: Beschränkungen der kognitiven Verarbeitung von Informationen insbesondere statistischer Art; Assoziationen zur Atombombe und daraus resultierende Ängste; Diskrepanzen zwischen den rationalen Methoden moderner politischer Entscheidungsfindung und der Intuition des Mannes auf der Straße.

Darüber hinaus werden Kommunikationsstörungen zwischen den für die Kernenergieeinführung zuständigen staatlichen Stellen, Vertretern der kerntechnischen Industrie und Experten auf der einen und den Bürgern auf der anderen Seite als zusätzliche Erklärung herangezogen. In anderen Erklärungsansätzen werden Ursachen für die Akzeptanzproblematik darin gesehen, daß die Gegner bestimmte Interessen oder Bedürfnisse durch die Einführung der Kernenergie verletzt sehen, wobei sowohl Probleme der lokalen und regionalen Entwicklung als auch gesamtgesellschaftliche Entwicklungsprozesse die Diskussion um die Einführung der Kernenergie beeinflussen. Diese Hintergründe scheinen für die in der vorliegenden Arbeit verfolgte Fragestellung besonders relevant, so daß innerhalb des folgenden Abschnitts noch näher auf sie eingegangen wird.

#### 5. Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie aus politischer Sicht

Die politische Bedeutung der Akzeptanzproblematik der Kernenergie liegt darin, daß signifikante Teile der Bevölkerung nicht bereit sind, die im politisch-administrativen System mit dem Anspruch gesamtgesellschaftlicher Verbindlichkeit getroffene Entscheidung zugunsten des Ausbaus der Kernenergie hinzunehmen. Die mangelnde Hinnahmefähigkeit manifestiert sich in demonstrativem politischem Verhalten, in einer skeptischen öffentlichen Meinung und in der Bildung von Bürgerinitiativen als einer neuen Form politischer Aktivität.

Derartige Erscheinungen sind allerdings nicht auf die nukleare Kontroverse begrenzt, sondern treten auch in anderen Politikbereichen auf, wie z.B. in den Bereichen Bildung, Städtebau, Verkehr und Umweltschutz. Es ist deshalb eine These der vorliegenden Analyse, daß die Akzeptanzproblematik der Kernenergie nicht allein als Reaktion auf die Risiken und Probleme der Kernenergie verstanden werden kann, sondern erst unter Einbeziehung der Zusammenhänge und Hintergründe von Akzeptanzproblemen auch in anderen Politikbereichen adäquat zu begreifen ist. Zu dieser

generellen Problematik kann die Analyse auf Vorarbeiten zurückgreifen, wonach insbesondere drei Ursachenkomplexe einem kritischeren Verhalten der Öffentlichkeit gegenüber politisch-administrativen Entscheidungen zugrunde liegen.

- (1) Mit dem Übergang vom liberalen Staat des 19. Jahrhunderts zum Sozialstaat des 20. Jahrhunderts hat ein funktionaler Wandel der öffentlichen Verwaltung eingesetzt, dem eine zunehmende Ausweitung der Staatsaufgaben zugrunde liegt. Neben die Ordnungs- und Dienstleistungsaufgaben treten aktive Gestaltungs- und Vorsorgefunktionen. Staatliches Handeln erschöpft sich nicht mehr allein in ordnenden und reaktiven Maßnahmen in einer primär sich selbst regulierenden gesellschaftlichen Ordnung, sondern der Staat muß intervenierend und zukunftsgestaltend eingreifen. Planung als Mittel zur Erhöhung der Steuerungskapazität des politischen Systems wird zum strukturierenden Merkmal administrativen Handelns. Mit der Zunahme staatlicher Funktionen und mit der Ausweitung planerisch zu bewältigender Zeiträume wird der Legitimationsaspekt problematisch: Die Interessenberücksichtigung Betroffener und die Antizipation negativer Folgewirkungen politischer Planung ist begrenzt; das relativ hohe Interventionspotential des Staates macht ihn zum Adressaten vielfältiger Forderungen, deren Berücksichtigung jedoch nur selektiv erfolgen kann; seine generelle Kompetenzausweitung stellt den Staat in die Verantwortung für zahlreiche vorhandene oder behauptete Folgekosten. Die Konsequenz ist, daß solche Insuffizienzen zu Enttäuschungen führen, die, über die verschiedenen Kanäle der politischen Kommunikation öffentlich bekannt gemacht, die loyale Hinnahmefähigkeit der Bevölkerung belasten.
- (2) Empirische Erhebungen, insbesondere zu Bürgerinitiativen, zeigen Ergebnisse, wonach in der Gesellschaft Werthaltungen wie soziale Gerechtigkeit und Selbstverwirklichung an Resonanz gewinnen, die die traditionellen materiellen Werte, wie wachsender Wohlstand und



persönliche Daseinssicherung, an relativer Bedeutung verlieren lassen. Hinweise auf solche Wertverschiebungen geben auch die Themen der öffentlichen Diskussion wie gesellschaftliche Randgruppen, Rolle der Frau, Mitbestimmung, Lebensqualität.

- (3) Der Anteil der Bevölkerung mit höherem Bildungsniveau hat in der jüngsten Vergangenheit signifikant zugenommen. Bessere Ausbildung und spezifische Sozialisationsprozesse während der Ausbildungszeit beeinflussen die kognitiven und motivationalen Strukturen in diesem Bevölkerungsteil dahingehend, daß daraus eine "höhere politische Fähigkeit" resultiert: konsistentere Ausformung eigener politischer Zielvorstellungen; Sensibilisierung gegenüber Diskrepanzen zwischen eigenen Vorstellungen und politischer Realität; größeres Selbstvertrauen in die eigene Fähigkeit, auf politische Prozesse aktiv Einfluß zu nehmen. Als Meinungsführer im jeweiligen sozialen Umfeld, als Teilnehmer kollektiver Aktionen und als Multiplikatoren im gesellschaftlichen Kommunikationsgeschehen geben sie auf vielfältige Weise Anstöße zu Bewußtseinsprozessen, die sich auch in weitere Kreise der Gesellschaft ausdehnen.

Eine aktuelle Folge dieser sozialstrukturellen Veränderungen ist die Problematisierung traditioneller, am quantitativen Wirtschaftswachstum orientierter Zielprojektionen des politisch-administrativen Systems in der öffentlichen Meinung und die Entstehung neuer Anforderungen, wie höhere Lebensqualität und Umweltschutz, auf die das politisch-administrative System kaum eingestellt ist und die es bisher nur zögernd berücksichtigt. Eine weitere Folge ist das Auftreten nicht-utilitaristischer Interessengruppen, deren Ziel die politische Durchsetzung solcher Forderungen ist. Ihre Thematik und entsprechend ihre soziale Basis liegen quer zu den traditionellen Konfliktlinien, etwa im Sinne des Links-Rechts-Schemas der Industriegesellschaft, so daß für die auf solche Konflikte eingespielten Interessenberücksichtigungs- und Konfliktabsorptionsmechanismen des politisch-administrativen Systems Probleme entstehen. So gelingt es z.B. bisher nicht, diese Gruppen in die bestehen-

den Parteien und Verbände einzufügen.

Einen integrierenden und stabilisierenden Einfluß auf viele solcher Gruppen hat die Umweltproblematik gewonnen. Unter diesem relativ umfassenden Thema konnten sich zahlreiche Bürgerinitiativen mit zunächst unterschiedlichen Zielsetzungen zusammenfinden und einen gewissen organisatorischen Zusammenhalt aufbauen. Diese sich selbst als Umweltschutzbewegung verstehende Formierung politisch aktiver Bürger hat ihre stärkste überregionale Bedeutung bisher vor allem durch die Möglichkeit gewonnen, bei aktuellen Anlässen größere Menschenmengen für spektakuläre Demonstrationsveranstaltungen zu mobilisieren.

Vor diesem Hintergrund ist die Kernenergieopposition zu sehen. Die Einführung der Kernenergie ist ein prototypischer Fall staatlicher Langzeitplanung, die sich primär an ökonomischen Kriterien orientiert. Diese stellen im Hinblick auf die oben skizzierten Wertorientierungen für einen Teil der Bevölkerung, der vermutlich als überdurchschnittlich politisch aktiv anzusehen ist, keine hinreichende Legitimationsbasis dar, um die nun im Zusammenhang mit dem Umweltproblem öffentlich thematisierten Risiken der Nukleartechnologie und die Probleme der Endlagerung und der Proliferationsgefahr rechtfertigen zu können. Aufgrund der als mangelhaft perzipierten Werteberücksichtigung durch Parteien, Verbände und Staat agiert die Opposition abseits der etablierten Kräfte des politischen Systems und versucht, sich mit Hilfe unkonventioneller Mittel zu profilieren und zu stabilisieren. Das gilt nicht nur für die Kernenergieopposition. Aber im Zusammenhang mit der Kernenergieeinführung ergeben sich dafür besonders geeignete Voraussetzungen: Durch die katastrophalen Folgen möglicher, aber unwahrscheinlicher Nuklearunfälle gewinnt das Thema der Umweltproblematik neue Dimensionen mit hohem Symbolgehalt für allgemeine Betroffenheit, wodurch in verstärktem Maße öffentliche Aufmerksamkeit mobilisiert werden kann. Zweitens schaffen die immer wieder neu zu fällenden Standortentscheidungen für nukleare Anlagen eine zusätzliche Betroffenheit der jeweiligen Anwohner, die eine relative Erhöhung der Risiken sowie besondere Belastungen

sich zukommen sehen. Dadurch bilden sich lokale oder regionale Zellen der Opposition, die in Kooperation mit den überregionalen Bürgerinitiativverbänden effektive Mittel zur Behinderung des nuklearen Ausbaus entwickeln können, die für die Umweltschutzbewegung als Erfolg zu Buche schlagen.

## 6. Entwicklungstendenzen der Kernenergieopposition

Aufgrund der wirtschaftlichen Krisenerscheinungen der letzten Jahre und der damit verbundenen hohen Arbeitslosenrate hätte man mit einer Schwächung der Kernenergieopposition und der Umweltbewegung rechnen können. Eine solche Entwicklung ist jedoch nicht eingetreten. Zwar ist die generelle Reformbereitschaft der Bevölkerung nach Befragungen von INFAS von 1968 bis 1974 ständig zurückgegangen. Der Umweltschutz genießt aber weiterhin hohe Priorität in der Bevölkerung; INFAS stellt sogar für den Zeitraum 1974 bis 1977 ein weiter gestiegenes Umweltbewußtsein fest. Im Jahre 1974 stuften 41 % den Umweltschutz als sehr wichtig ein, im Mai 1977 waren es 59 % /INFAS (1977)/. Einerseits könnte man diese Entwicklung auf eine allgemeine und direkte Betroffenheit durch verschlechterte Umweltbedingungen am Arbeitsplatz und in der Freizeit zurückführen, die gleichsam die Verbesserung der Umweltbedingungen zu einem existentiellen Bedürfnis werden läßt und auf die Ebene der Grundbedürfnisse hebt. Andererseits könnte diese Entwicklung darauf hindeuten, daß große Teile der Bevölkerung keinen Zielkonflikt zwischen Wachstum und Arbeitsplatzsicherheit auf der einen und Umweltschutz auf der anderen Seite sehen. Eine Befragung in der Berliner Bevölkerung durch das Internationale Institut für Umwelt und Gesellschaft des Wissenschaftszentrums Berlin ergab z.B. in bezug auf diese Problematik, daß 45 % der Befragten glauben, das Arbeitsplatzangebot werde durch Umweltschutzmaßnahmen erhöht, während nur 3 % gegenteiliger Meinung waren und 23 % glaubten, daß Umweltschutzmaßnahmen keinen Einfluß auf das Arbeitsplatzangebot haben /IIUG (1978)/.

Die Entwicklung der Meinungsbildung zur Kernenergie zeigt eine ähnliche Tendenz: Im Herbst 1977 waren noch 51 % der Bundesbürger für den Bau der Kernkraftwerke, während 27 % dagegen votierten und 22 % keine Meinung zu dem Thema hatten. Im Winter 1977/78 meinten 45 % der Bundesbürger, man solle so lange keine Kernkraftwerke mehr bauen, bis alle Sicherheitsprobleme vollständig gelöst seien, während 44 % es für ausreichend hielten, den Betrieb von Atomkraftwerken so sicher zu machen, wie es "menschmöglich" sei. Im Frühjahr 1978 waren 37 % für Kernkraftwerke, weil sie Arbeitsplätze sichern; 35 % waren gegen Kernkraftwerke, weil sie das Leben gefährden; 28 % hatten hierzu keine Meinung /NOELLE-NEUMANN (1978)/.

Es zeigt sich somit, daß die für das Wachstum und die Stabilität von "Bewegungsorganisationen" - als solche sind die Umweltbewegung und die Kernenergieopposition organisationssoziologisch einzuordnen - notwendige Unterstützungsbasis in der umgebenden Gesellschaft in diesem Falle weiterhin gegeben ist bzw. sich noch weiter verstärkt hat. Hinzu kommt, daß die Bürgerinitiativen auch zunehmend von den etablierten Institutionen der Gesellschaft (Parteien, Regierung, Administration, Verbände) als Partner anerkannt werden.

Als weitere stabilisierende Faktoren für die Umweltbewegung und ihre Organisationen können Transformationen der Bürgerinitiativen selbst vermutet werden. Einerseits sind dies Zieltransformationen. Es deutet sich an, daß Bürgerinitiativen zunehmend ihre Ziele auf umfassende ökologische Zielsetzungen ausweiten. So gaben in einer Untersuchung über Umweltschutz-Bürgerinitiativen 59 % der Initiativen an, daß sie sowohl konkrete als auch allgemeine Ziele, nämlich die Einflußnahme auf die Entwicklung umweltpolitischer Programme generell, verfolgen; 7 % der Initiativen haben sich ganz auf allgemeine Probleme verlegt /ANDRITZKY (1978)/. Zugleich wurde in dieser Untersuchung auch ermittelt, daß 60 % der befragten Umweltschutzinitiativen den mit der Verfolgung der ursprünglichen Aktionsziele verbundenen Lernprozeß für die Mitglieder für ebenso wichtig halten wie das Erreichen der jeweiligen konkreten Zielsetzungen.

Diese Zieltransformationen erklären zum Teil das Überleben von Bürgerinitiativen trotz fehlender Erfolge in bezug auf die ursprünglich anvisierten Zielsetzungen.

Andererseits sind auch organisatorische Transformationen mit stabilisierenden Effekten festzustellen. So waren 58 % der von Andritzky befragten Umweltschutzinitiativen als eingetragene Vereine organisiert und jede fünfte als gemeinnützig anerkannt /ANDRITZKY (1978)/. Weitere Indizien für die organisatorische Konsolidierung sind die Abhaltung regelmäßiger Mitgliederversammlungen, verstärkte Anforderungen an die Mitarbeit der Mitglieder sowie die Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung in überregionalen Organisationen.

Zusammenfassend kommt man zu dem Ergebnis, daß auch weiterhin mit einer politisch folgenreichen Opposition gegen die Kernenergie gerechnet werden muß: Vor dem Hintergrund der sozialstrukturellen Entwicklungen

- eines säkularen Wandels des politisch-administrativen Systems,
- einer tendenziellen relativen Abwertung materieller Ziele in den Werthaltungen der Bevölkerung,
- einer sozialen Ausweitung höherer Bildung

löst der Umweltschutzgedanke eine Art soziale Bewegung aus, die in den Bürgerinitiativen ihre organisatorische Form findet. Diese Initiativen scheinen sich zunehmend als politische Kraft zu etablieren, und zwar sowohl aufgrund wachsender Aufmerksamkeit in Gesellschaft und Politik gegenüber der Umweltproblematik als auch durch eine organisatorische Konsolidierung und eine Erweiterung ihres Zielprogramms.

## VI. Kernmaterialüberwachung

### 1. Einleitung

Kernmaterial bedarf eines besonderen Schutzes wegen seines hohen wirtschaftlichen Wertes, wegen seiner Toxizität (besonders im Falle von Plutonium) und schließlich wegen seiner militärischen Bedeutung, d.h. wegen seiner Verwendbarkeit zum Bau von nuklearen Waffen. Üblicherweise wird der Gesamtkomplex der Kernmaterialüberwachung eingeteilt in die Kernmaterialsicherung, die den generellen Schutz von Material und Anlagen beinhaltet, und in die Spaltstoffflußkontrolle, die dem Zweck der Nicht-Weiterverbreitung von nuklearen Waffen dient. Die Spaltstoffflußkontrolle stellt eine nationale und internationale Aufgabe dar, der man im internationalen Rahmen im wesentlichen mit detektierenden Maßnahmen gerecht zu werden versucht. Demgegenüber hat das nationale Kernmaterial-sicherungssystem die Aufgabe, den Diebstahl von Kernmaterial für illegale Zwecke (z.B. zur Herstellung von nuklearen Sprengsätzen oder zur Dispersion von Kernmaterial zum Zwecke einer radiologischen Verseuchung) sowie Sabotageakte gegen kerntechnische Einrichtungen durch subnationale Gruppen zu verhindern bzw. zu detektieren und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Im folgenden soll der Bereich der Spaltstoffflußkontrolle etwas ausführlicher behandelt werden, da für die hier auftretenden Probleme ganz neuartige Wege zur Lösung beschritten werden mußten, während sich die für die Kernmaterialsicherung zu treffenden Maßnahmen nicht wesentlich von den entsprechenden Maßnahmen in anderen Bereichen unterscheiden.

### 2. Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen

Bei den Verhandlungen zum Nichtverbreitungsvertrag (NV-Vertrag) in den Jahren 1965-1968 wurde schon zu einem frühen Zeitpunkt der Kontroll-

aspekt eingebracht. Über die Details solcher internationalen Kontrollen gab es jedoch zu Beginn noch keine klaren oder aber sehr unterschiedliche Auffassungen, obwohl es in den USA und in den UdSSR schon seit über 20 Jahren Erfahrungen mit nationalen Kontrollen gab und obwohl die Internationale Atomenergie Organisation (IAEO) in Wien seit längerer Zeit mit trilateralen Kontrollen betraut worden war und entsprechende Prozeduren entwickelt hatte.

Da die Nicht-Kernwaffenstaaten befürchteten, daß die Wettbewerbsfähigkeit ihrer Nuklearindustrie durch solche internationalen Kontrollen beeinträchtigt werden könnte, einigten sie sich sehr bald darauf, daß Kontrollen nur dann akzeptiert werden könnten, falls diese die Bedingungen "rational", "objektiv" und "formalisiert" erfüllen würden. "Rational" heißt dabei, daß es vernünftige Gründe für jede einzelne Kontrollmaßnahme geben muß, "objektiv" heißt, daß nicht ein Staat bzw. eine Anlage gegenüber anderen benachteiligt werden darf, und "formalisiert" heißt, daß die Kontrollen nach vorgeschriebenen Regeln ausgeführt werden müssen.

Drei Kontrollprinzipien wurden zur Diskussion gestellt, nämlich Materialbilanzierung, Dichte Umhüllung und Beobachtung. Unter "Materialbilanzierung (accountability)" ist bei der hier gegebenen Problematik der Vergleich zwischen dem "Buchinventar", d.h. den aufaddierten Materialeingängen und -ausgängen in bzw. aus einer Materialbilanzzone während der Inventurperiode, und dem realen Inventar am Ende der Inventurperiode zu verstehen. Unter "Dichter Umhüllung (containment)" ist sowohl die physische Sicherung des spaltbaren Materials, z.B. durch Betonmauern oder durch unfallsichere Behälter, zu verstehen als auch die Anbringung von Siegeln, die Einrichtung von Alarmanlagen etc. Schließlich gibt es Orte und Situationen in der Nuklearindustrie, wo als einzige Überwachungsmaßnahme die "direkte Beobachtung (surveillance)" denkbar ist, z.B. bei Umladevorgängen in Reaktoren.

Aus der Beschreibung der drei genannten Prinzipien wird sofort klar, daß das Materialbilanzierungsprinzip die drei oben genannten Bedingungen am

besten, das Beobachtungsprinzip diese Bedingungen dagegen am schlechtesten erfüllt. In der Tat wurde der Materialbilanzierung auch der Vorzug gegeben; als Konzept der "strategischen Punkte" fand es in der endgültigen Formulierung des Nichtverbreitungsvertrages seinen Platz.

Am 12. Juni 1968 wurde der Entwurf des NV-Vertrages von der UN-Generalversammlung gebilligt und am 1. Juli 1968 in Moskau, Washington und London unterzeichnet. Die IAE0 in Wien wurde mit der Durchführung der im Vertrag vorgesehenen Kontrollen betraut. Am 5. März 1970 trat der Vertrag in Kraft, nachdem er von 43 Staaten ratifiziert worden war.

### 3. Das Modellabkommen der IAE0

Gleich nach Inkrafttreten des NV-Vertrages ging die IAE0 daran, die Folgerungen aus dem in Artikel III enthaltenen Mandat für die Organisation der Kontrollen zu ziehen. Das IAE0-Sekretariat mußte in die Lage versetzt werden, Kontrollabkommen mit denjenigen Nicht-Kernwaffenstaaten auszuhandeln, die den NV-Vertrag ratifiziert hatten und damit verpflichtet waren, mit der IAE0 Verhandlungen aufzunehmen. Der IAE0-Gouverneursrat beschloß deshalb in einer Sondersitzung im April 1970, einen Ausschuß einzusetzen, der Vorschläge über die Rolle der IAE0 im Zusammenhang mit den vom NV-Vertrag vorgeschriebenen Sicherungsmaßnahmen und im besonderen über den Inhalt der im NV-Vertrag vorgesehenen Übereinkünfte unterbreiten sollte. Um eine möglichst breite Basis für diese Vorschläge zu gewinnen, wurde auch den Mitgliedsstaaten, die nicht im Gouverneursrat vertreten waren, die Möglichkeit eröffnet, im Ausschuß mitzuwirken. Die Bundesrepublik Deutschland konnte daher an den Arbeiten des Ausschusses teilnehmen.

In insgesamt 81 Sitzungen gelang es dem Ausschuß, ein offenbar alle Delegationen befriedigendes Ergebnis zu erreichen. Im März 1971 legte er dem IAE0-Gouverneursrat seinen Abschlußbericht vor. Formal als Verhandlungsrichtlinien für den Generaldirektor gefaßt, stellten die insgesamt



116 Paragraphen umfassenden Vorschläge praktisch ein Modellabkommen dar. Dazu kamen Bestimmungen über die Finanzierung der Kontrollen sowie Empfehlungen über die physische Sicherheit von Kernmaterial und die Verwirklichung der von den Vereinigten Staaten und Großbritannien im Zusammenhang mit dem NV-Vertrag gemachten Angebote, ihre zivile Kernenergie-tätigkeit freiwilligen internationalen Sicherungsmaßnahmen zu unterwerfen. Die Vorschläge des Ausschusses wurden vom Gouverneursrat im April 1971 gebilligt.

Das Ziel der Kontrolle wurde in § 28 des Modellabkommens sehr präzise wie folgt definiert:

"Das Abkommen soll vorsehen, daß das Ziel der Überwachung die rechtzeitige Entdeckung einer Entwendung signifikanter Mengen Kernmaterials aus friedlichen Aktivitäten zum Bau von Kernwaffen oder anderer explosiver Vorrichtungen oder für andere unbekannte Zwecke ist, und die Abschreckung solcher Entwendung durch das Risiko einer frühzeitigen Entdeckung."

Gleichzeitig wurden in den beiden folgenden Paragraphen die Kontrollprinzipien und das zu erreichende Ergebnis einer konkreten Kontrolle festgelegt:

"Zu diesem Zweck soll das Abkommen die Verwendung der Materialbilanzierung als die Überwachungsmaßnahme von fundamentaler Bedeutung vorsehen, mit dichter Umhüllung und Beobachtung als wichtigen ergänzenden Maßnahmen.

Das Abkommen soll vorsehen, daß die technische Schlußfolgerung der Verifikationsaktivitäten der IAEA eine Aussage in bezug auf jede Materialbilanzzone über den Fehlbetrag für eine Inventurperiode sein soll, wobei auch die Genauigkeitsgrenzen angegeben werden sollen."

Damit war also die dominierende Rolle des Materialbilanzierungsprinzips festgeschrieben worden, was eine Erfüllung der früher genannten Bedingungen bedeutete. Damit war auch klargestellt worden, daß das spaltbare Material, nicht jedoch die kerntechnischen Anlagen Gegenstand

der Kontrollen waren, was zu Beginn der Verhandlungen nicht selbstverständlich gewesen war und womit eine große Sorge der kerntechnischen Industrie ausgeräumt werden konnte.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis der Verhandlungen war die Festlegung der Überwachungsprozedur. Entsprechend dem Modellabkommen nimmt der Betreiber einer kerntechnischen Anlage alle Daten auf, die zur Erstellung einer Materialbilanz notwendig sind, und berichtet diese der für ihn zuständigen nationalen bzw. regionalen Behörde. Diese gibt die Daten in zusammengefaßter Form an die IAE0 weiter. Die IAE0 verifiziert diese Daten durch unabhängige, eigene Messungen auf der Basis eines Stichprobenplanes. Ergeben sich zwischen den berichteten und den IAE0-Daten keine signifikanten Unterschiede, so übernimmt die IAE0 alle Daten des Anlage-Betreibers und stellt die Materialbilanz auf.

#### 4. EURATOM-Kontrollen

Auf der Grundlage des Modellabkommens konnte das IAE0-Sekretariat in der Folgezeit ohne größere Schwierigkeiten die nach dem NV-Vertrag erforderlichen Kontrollabkommen mit Nichtkernwaffenstaaten, die Vertragsparteien waren, abschließen. Ein besonderes Problem stellten jedoch die EURATOM-Länder dar. Sie hatten anläßlich der Unterzeichnung des NV-Vertrags im November 1969 erklärt, sie würden den NV-Vertrag erst dann ratifizieren, wenn zwischen EURATOM und IAE0 ein Abkommen abgeschlossen sei, das auf der Grundlage des Prinzips der Verifikation beruhe und die politischen, wirtschaftlichen und technischen Aufgaben von EURATOM nicht beeinträchtige.

Die Verhandlungen über ein Verifikationsabkommen wurden im November 1971 aufgenommen und dauerten bis Juli 1972. Sie waren schwierig; so mußte bei der IAE0-Delegation zunächst erst einmal Verständnis für die institutionelle Struktur der Gemeinschaft, für die von den einzelnen Mitgliedstaaten unabhängige Stellung der Kommission und ihre direkt auf

die Benutzer von Kernmaterial sich erstreckenden Befugnisse auf dem Gebiet von Sicherungsmaßnahmen sowie für die Modalitäten der Buchführung und Inspektionen der Kommissionen geweckt werden.

Das Abkommen wurde am 5. April 1973 unterzeichnet und zusammen mit dem NV-Vertrag am 20.2.1974 vom Deutschen Bundestag ratifiziert; am 21.2.1977 trat das IAE0-EURATOM Verifikationsabkommen in Kraft. Der Abschluß dieses Abkommens wurde von EURATOM und von der IAE0 als Erfolg angesehen. Die Unsicherheit über die Zukunft des IAE0-Kontrollsystems schien damit behoben. Die Gemeinschaft war als eines der Durchführungsorgane des Nichtverbreitungsvertrages anerkannt worden.

## 5. Offene Fragen

Im Sommer 1977 wurden in der Bundesrepublik Deutschland die ersten Inspektionen nach dem Verifikationsabkommen durchgeführt. Da diese noch prototypischen Charakter hatten, läßt sich noch nicht absehen, ob sie sich in dieser Form bewähren werden, d.h. eine wirkliche Erfahrung mit den nunmehr eingeführten Kontrollen besteht noch nicht.

Die Probleme der Implementierung sind organisatorischer Art (Einarbeitung der Inspektoren in die Materie, Aufbau einer Infrastruktur für die Materialbilanzierung und des Berichtswesens u.ä.m.) und technisch-wissenschaftlicher Art (Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Meßinstrumente, Entwicklung einfacher Auswerteverfahren u.ä.m.).

Eine zentrale offene Frage ist durch die schnell wachsenden Durchsätze kerntechnischer Anlagen gegeben, da die Ungenauigkeiten der wesentlichen Messungen ungefähr proportional zum Durchsatz sind und in absehbarer Zeit nicht entscheidend verbessert werden können. Ein Versuch zur Lösung dieser Frage besteht darin, die Materialbilanzierungsmaß-

nahmen durch direkte Beobachtung und Umhüllungsmaßnahmen zu ergänzen, obwohl auch dieser Weg aufgrund der Problematik der Objektivierung von Aussagen über die Wirksamkeit dieser Maßnahmen größere Schwierigkeiten aufweist.

Literaturverzeichnis<sup>+)</sup>

ANDRITZKY, W.

Erstmals wissenschaftlich untersucht: Bürgerinitiativen  
Bild der Wissenschaft, (1978)2, 84-93

BAIR, W.J., BALLOU, J.E., PARK, J.F., SANDERS, C.L.

Plutonium in Soft Tissues with Emphasis on the Respiratory Tract  
in: M.C. Hodge, J.N. Stannard, J.B. Hirsch (Hrsg.)  
Handbuch der experimentellen Pharmakologie XXXVI, S. 503  
Heidelberg 1973

BAIR, W.J., THOMAS, J.M.

Prediction of the Health Effects of Inhaled Transuranium  
Elements from Animal Data  
in: IAEA (ed.), Transuranium Nuclides in the Environment, Symp. in  
San Francisco (1975), S. 569  
Wien 1976

BAYER, A.

Modelle zur Berechnung der radiologischen Belastung durch  
kerntechnische Anlagen bei Normalbetrieb - Teil I: Luftweg  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht (in Vorbereitung)  
(1978)

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Die künftige Entwicklung der Energienachfrage und deren Deckung -  
Perspektiven bis zum Jahre 2000  
Abschnitt III: Das Angebot von Energie-Rohstoffen  
Hannover, März 1976

BMFT / FICHTNER

Forschungsbericht T 77-36  
Technologien zur Einsparung von Energie  
Stuttgart, Juli 1977

---

<sup>+)</sup>  In diesem Literaturverzeichnis ist nur die Literatur aufgeführt,  
auf die im Text der Kurzfassung unmittelbar Bezug genommen wird.  
Bezüglich der anderen benutzten Literatur wird auf die Literatur-  
verzeichnisse der Langfassungen der Teilstudien verwiesen.

BMI (Bundesministerium des Innern)

Allgemeine Berechnungsgrundlagen für die Bestimmung der  
Strahlenexposition durch Emission radioaktiver Stoffe  
mit der Abluft  
Empfehlung der Strahlenschutzkommission  
Oktober 1977 (1977a)

BMI (Bundesministerium des Innern)

Sicherheitsstudie für Hochtemperaturreaktoren unter  
deutschen Standortbedingungen  
1. Zwischenbericht, Kritische Bewertung der AIPA-Studie  
Oktober 1977 (1977b)

BOHN, T., EICH, P., HANSEN, U., JEHLE, B.

Künftige Stromgestehungskosten von Großkraftwerken  
Jül-Spez-2, November 1977

BRIGGS, G.A.

Plume Rise  
US Atomic Energy Commission, Division of  
Technical Information  
Oak Ridge (1969)

DEGENS, E.T., et al

Uranium Anomaly in Black Sea Sediments  
Nature, Vol. 269, Nr. 13, Okt. 1977, S. 566-569

DEUTSCHES ATOMFORUM

Konsequenzen des vom F.D.P.-Hauptausschuß geforderten Kernenergie-  
Moratoriums  
Bonn, im August 1977

DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung)

Auswirkungen des Baus eines Kernkraftwerks auf Produktion und Erwerbs-  
tätigenzahl - Ergebnisse einer Input-Output-Analyse  
DIW-Berichte, Heft 26-27 (1976), S. 256-259 (1976a)

DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung)

Auswirkungen des Baus und des Betriebs eines Steinkohlenkraftwerks  
auf Produktion und Erwerbstätigenzahl - Ergebnisse einer Input-  
Output-Analyse

DIW-Wochenbericht 48, 2. Dezember 1976

(1976b)

DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung)

Volkswirtschaftliche Auswirkungen durch eine Beeinträchtigung des  
Baus von Kernkraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland  
Gutachten im Auftrage des Bundesministers für Wirtschaft, Bonn  
Berlin, im August 1977

DWK (Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von  
Kernbrennstoffen)

Bericht über das in der Bundesrepublik Deutschland  
geplante Entsorgungszentrum für ausgediente Brenn-  
elemente aus Kernkraftwerken

Hannover, September 1977

ESSO AG

Oeldorado 77

Hamburg 1978

HABASHI, F.

Uranium in Phosphate Rock

Spec. Publ, 52, Montana College of Mineral Science and Technology

Butte, Montana, Dec. 1970

ICRP (International Commission on Radiological Protection)

The Evaluation of Risks from Radiation

ICRP Publication 8, Oxford 1966

Deutsche Übersetzung: Abschätzung der Strahlenrisiken

Stuttgart - New York 1977

IIUG (Internationales Institut für Umwelt und Gesellschaft)

Berlin: Bürgerinitiativen über Umweltschutz und Umweltpolitik

WZB-Mitteilungen Nr. 3, (Nov. 1978), S. 9 f

INFAS (Institut für Angewandte Sozialwissenschaften)

Gestiegenes Umweltbewußtsein  
Umwelt, (1977)58, S. 3-8

JAEK, W., u.a.

Studie E1-2: Nukleare Primärenergieträger  
Teil I, 1: Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit der Bundes-  
republik Deutschland mit Kernbrennstoffen  
KFA-STE, Jülich, Aug. 1977

MAYS, C.W., LLOYD, R.D., MARSHALL, J.H.

Malignancy Risk to Humans from Total Body- $\gamma$ -Ray  
Irradiation  
Proc. III. Int. IRPA Congress, S. 417  
Washington, D.C., 1973

Mc BRIDE, J.P., et al.

Radiological Impact of Airborne Effluents of Coal-  
Fired and Nuclear Power Plants  
Oak Ridge National Laboratory  
ORNL-5315, (1977)

MICHAELIS, H.

Ist Kernenergie wirtschaftlich?  
Aktuelle Themen, Kerntechnische Gesellschaft  
KAT-3-77 (1977) (1977b)

MIT (Massachusetts Institute of Technology)

Energy: Global Prospects 1985-2000  
Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies (WAES)  
Cambridge, Mass., 1977

NOELLE-NEUMANN, E.

Mehrheit für Kernenergie?  
Atomwirtschaft-Atomtechnik, November 1978, S. III

NUCLEAR NEWS

Uranium Find in Sweden  
Nuclear News, 20(1977)13, S. 62



OECD

Uranium - Resources, Production and Demand -  
Paris, December 1977

PAPADOPOULOS, D.

Inhalationsdosisfaktoren für Plutonium  
in: Jahresbericht 1977 der Abteilung Strahlenschutz  
und Sicherheit  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2620  
März 1978

PAPP, R.

Brennstoffmengen, Aktivitätsinventare und radioaktive Frei-  
setzungen bei der Energieerzeugung auf der Basis von Leicht-  
wasserreaktoren und Schnellen Natriumbrütern  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 2453 (1977)

SEIDEL, A.

Verhalten und Wirkung von Transuranelementen im Säugetierorganismus  
Chemiker-Zeitung 99 (1975), S. 370

SEIDEL, A.

Verhalten kerntechnischer Schadstoffe im Organismus  
Chemiker-Zeitung 101 (1977), S. 248

SCHMITT, D., JUNK, H., EBERSBACH, K.F., PRECHTL, H.

Parameterstudie zur Ermittlung der Stromerzeugungskosten  
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln  
Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München  
Köln und München, September 1977 (vervielfältigtes Manuskript)

SCHÜCKLER, M.

Modelle zur Berechnung der radiologischen Belastung  
durch kerntechnische Anlagen bei Normalbetrieb  
Teil II: Wasserweg  
Kernforschungszentrum Karlsruhe, Bericht (in Vorbereitung)  
(1978)

SCHULTEN, R., u.a.

HTR-Nahebrüterkonzept zur Spaltstoffersparnis  
atw XXII/2, Februar 1977, S. 92-96

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects  
of Atomic Radiation)

Sources and Effects of Ionizing Radiation  
United Nations, New York 1977

USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission)

Reactor Safety Study  
An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial  
Nuclear Power Plants (Wash 1400)  
Washington, D.C., 1975

WORLD ENERGY CONFERENCE

The Contribution of Nuclear Power to the World  
Energy Supply 1975 to 2020, Executive Summary  
WEC, Istanbul, August 1977