

KfK 2701
ASA/ZE-10/78
Oktober 1978

Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

Studienleiter: H. Paschen
Abteilung für Angewandte Systemanalyse

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

D. Wintzer, H. Tangen

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Abteilung für Angewandte Systemanalyse

KFK 2701
ASA/ZE-10/78

KONSEQUENZEN DES GROSSTECHNISCHEN EINSATZES DER KERNENERGIE
IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

Studienleiter: H. Paschen

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

D. Wintzer, Abteilung für Angewandte Systemanalyse
H. Tangen, Abteilung Ingenieurtechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland

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

Zusammenfassung

Ausgehend von unterschiedlichen Annahmen über die langfristige Entwicklung des Primärenergiebedarfs und anderer Einflußgrößen werden exemplarisch drei Modelle für den Ausbau der Kernenergiekapazität in der Bundesrepublik Deutschland ausgewählt. Auf sie beziehen sich Berechnungen technischer bedingter Mengenanforderungen an Natururan, Trennarbeit, Brennelementfabrikation und Baukapazität für Reaktoren.

Zur Verdeutlichung der Bedingungen für den Uranimport der Bundesrepublik wird die von den Vorräten, ihrer geographischen Verteilung und der Nachfrage nach Uran geprägte weltweite Versorgungssituation diskutiert. Dazu wird die Abhängigkeit des jährlichen und zeitlich kumulierten Uranbedarfs von Art, Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit uransparen-der Reaktoren untersucht. Anforderungen und mögliche Schwierigkeiten bei der Uranversorgung werden vor dem Hintergrund von Daten über die Reserven- und Ressourcensituation beschrieben.

Consequences of Large-scale Implementation of Nuclear Energy in the Federal Republic of Germany

Part I: Large-scale Implementation of Nuclear Energy in the Federal Republic of Germany - Nuclear Fuel Demand and Possible Problems of Supply

Abstract

Three scenarios of the future installation of nuclear capacity in the Federal Republic of Germany are selected on the basis of assumptions concerning long-term demand of primary energy and other factors of influence for the expansion of nuclear energy. The corresponding demand for natural uranium, the requirements for separative work and fuel fabrication, and the situation with regard to reactor construction capacity are described.

Because of the heavy dependence of the Federal Republic of Germany on uranium imports, the world-wide development of uranium demand and supply is discussed in some detail. For this purpose, the dependence of the yearly and cumulative uranium demand on the type and the time and speed of introduction of breeding or high converting reactors is analysed. The uranium demand situation and possible difficulties on the supply side are described against the background of uranium reserve and resource data.

Die Studie "Konsequenzen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland" wurde im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen (AGF) erstellt.

Sie umfaßt die folgenden Teilstudien:

- Teil I: Anforderungen an die Versorgung mit Kernbrennstoffen und mögliche Versorgungsprobleme bei einem großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
- Teil II: Fragen der Brennstoffentsorgung bei einem großtechnischen Einsatz der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
- Teil III: Wirtschaftliche Fragen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
- Teil IV: Umweltauswirkungen von Kernkraftwerken und Anlagen des kerntechnischen Brennstoffkreislaufs
- Teil V: Die Akzeptanzproblematik der Kernenergie
- Teil VI: Kernmaterialüberwachung

Teil I:

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

G l i e d e r u n g

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

1. Einleitung
2. Modellentwicklungen des großtechnischen Einsatzes der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland
 - 2.1 Primärenergienachfrage
 - 2.2 Modelle des Kernenergieeinsatzes
 - 2.3 Annahmen zur Einführung uransparender Reaktortypen
3. Zubau von Reaktoren und Brennstoffversorgung (Bundesrepublik Deutschland)
 - 3.1 Zubau von Reaktoren
 - 3.2 Brennelementfabrikation
 - 3.3 Trennarbeit
 - 3.4 Uranbedarf
 - 3.5 Uranvorräte
 - 3.6 Vergleich des Uranbedarfs mit den Uranvorräten

- 4. Abschätzungen zur Entwicklung des weltweiten Uranbedarfs
- 4.1 Der Umfang der künftigen Kernenergienutzung
- 4.2 Die Rolle uransparender Reaktortypen
- 4.3 Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit uransparender Reaktoren
- 4.4 Die Auswirkung wichtiger Einflußgrößen auf den jährlichen und kumulierten Uranbedarf
- 4.5 Randbedingungen durch Grenzen zeitlicher Machbarkeit
- 4.6 Uranbedarf für uransparende Reaktoren

- 5. Die Uranvorräte der Welt und ihre Verfügbarkeit
- 5.1 Uranvorräte
- 5.2 Statische Beurteilung der Vorratssituation
- 5.3 Erforderliche Zufundraten
- 5.4 Ausbau der Förderkapazität
- 5.5 Geographische Verteilungsstruktur bei Uranbedarf und Uranversorgung

Anhänge:

- Anhang 1: Erläuterungen zur betrachteten Bandbreite der Primärenergienachfrage für die Bundesrepublik Deutschland
- Anhang 2: Modellannahmen über den Ausbau der Kernenergiekapazität
- Anhang 3: Verwendete Reaktordaten
- Anhang 4: Zeitbetrachtungen zum externen SBR-Brennstoffkreislauf
- Anhang 5: Abzuklärende verfahrenstechnische Fragen beim externen SBR-Brennstoffkreislauf

Literaturverzeichnis



Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

A Bundesrepublik Deutschland

Die Analyse von Fragen der Versorgung mit Kernbrennstoffen erfolgt für drei Entwicklungen der installierten Kernenergiekapazität in der Bundesrepublik, die als Beispiele für einen großtechnischen Einsatz ausgewählt wurden. Die Auswahl erfolgte anhand von Annahmen über die längerfristige Primärenergienachfrage ($600 \text{ GW}_{\text{th}}$ bis $1000 \text{ GW}_{\text{th}}$) und über den Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung (60 % bis 75 %) und im nichtelektrischen Bereich (15 % bis 30 %). Für Primärenergienachfrage und Kernenergieeinsatz wurden für das nächste Jahrhundert ständig sinkende Zuwachsraten unterstellt. Die Annahmen begrenzen die installierte Kernenergiekapazität auf etwa $250 \text{ GW}_{\text{th}}$ bis $750 \text{ GW}_{\text{th}}$ (entsprechend $100 \text{ GW}_{\text{e}}$ bis $300 \text{ GW}_{\text{e}}$). Die für 1985 betrachtete Spanne reicht von 18 GW_{e} bis 33 GW_{e} .

Die Untersuchungen beziehen sich auf jeweils 2 Varianten, die sich durch den Zeitpunkt für den Beginn des kommerziellen Einsatzes uransparender Reaktoren unterscheiden.

Quantitative Analysen dieser ausgewählten Entwicklungen führen zu folgenden Aussagen:

- (1) Bei ausschließlichem Einsatz von Leichtwasserreaktoren würde der kumulierte Bedarf an Natururan bis zum Jahre 2100 je nach Umfang des Kernenergieeinsatzes zwischen 1,5 Mio t und 4,2 Mio t liegen. Zum Vergleich: Die gegenwärtig identifizierten Ressourcen der westlichen Welt betragen 4,3 Mio t U bei Gewinnungskosten bis zu 130 \$/kg U.
- (2) Bei einem Kernenergieeinsatz im untersuchten Umfang wird deshalb ein Übergang zu uransparenden Reaktorsystemen zur Verringerung der Abhängigkeit von Uran-Exportländern erforderlich sein.

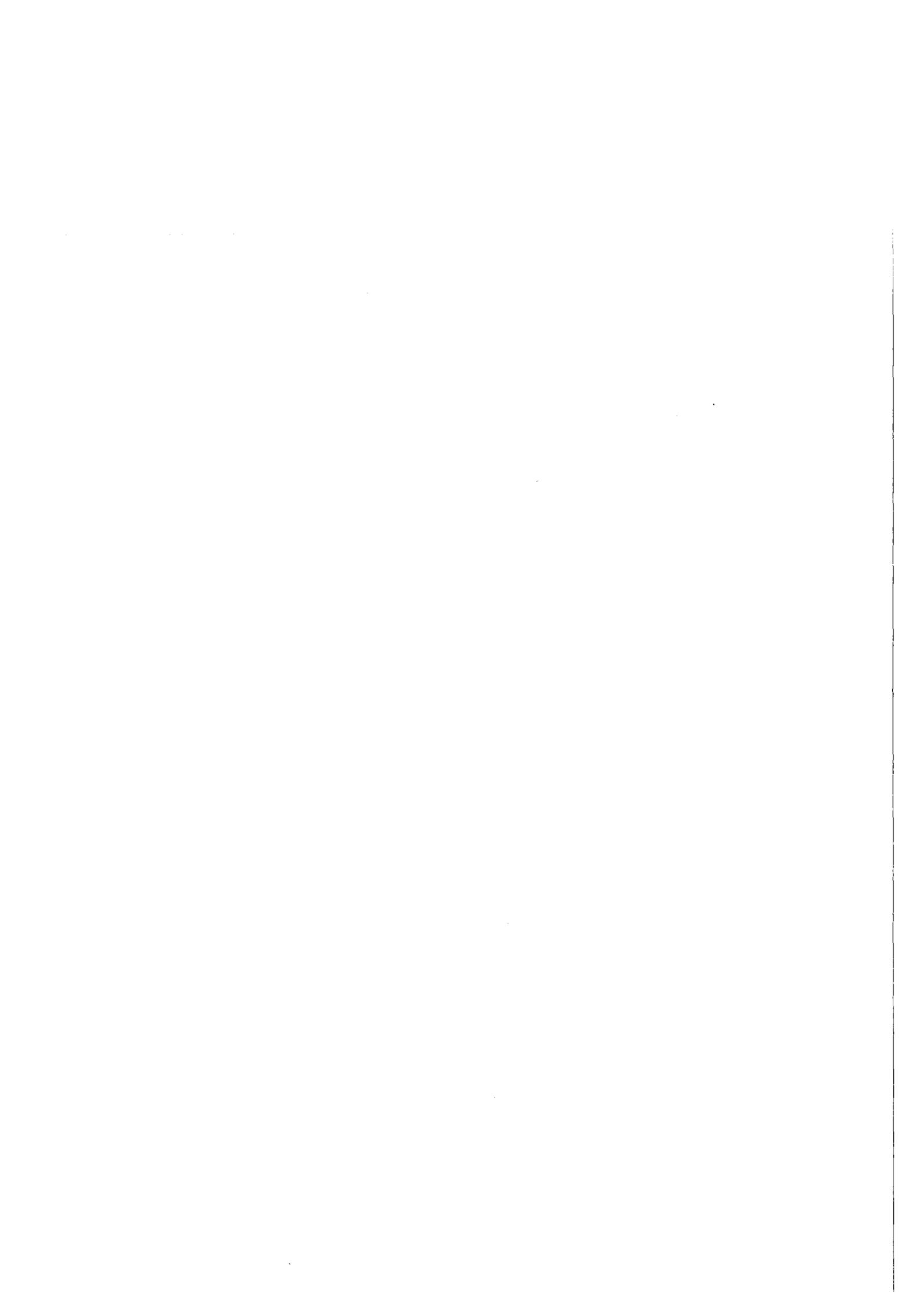
- (3) Der kumulierte Uranbedarf kann am stärksten durch Einführung schneller Brutreaktoren reduziert werden.
- (4) Auch in diesem Fall ist jedoch noch mit einem kumulierten Uranbedarf von 350 000 t bis 880 000 t zu rechnen, wenn die kommerzielle Einführung der Brutreaktoren bereits im Jahre 2000 erfolgt. Der Uranbedarf hängt empfindlich vom Einführungszeitpunkt ab.
- (5) Während die Fabrikation von Brennelementen für Leichtwasserreaktoren bereits länger industriell erfolgt, wird die Demonstration wirtschaftlicher Brennelementfabrikation aus radioaktivem Rückführbrennstoff und der zugehörigen Wiederaufarbeitung zu den zeitlichen Engpässen gehören, die den Zeitpunkt der kommerziellen Einführung uransparender Reaktortypen bestimmen.
- (6) Die mit rund 20 000 t Uran zu veranschlagende Summe aus gesicherten, zusätzlich vermuteten und "prognostischen" Vorräten der Bundesrepublik würde nur ausreichen, um 4 Leichtwasserreaktoren gegenwärtigen Bautyps während ihrer Lebensdauer mit Uran zu versorgen. Die Bundesrepublik wird in den nächsten 50 Jahren weiter ganz überwiegend von Uranimporten abhängen. Dabei bestehen Versorgungsrisiken.
- (7) Zeitlich gesehen fällt der höchste jährliche Uranbedarf etwa 10 Jahre nach dem Einführungszeitpunkt für uransparende Reaktoren an. Bei Einführung im Jahre 2000 erreicht er Werte zwischen etwa 10 000 t U/a und 25 000 t U/a.
- (8) Wenn man von Reaktorexporten absieht, müßte die Kapazität der Industrie zur Reaktorerstellung in der Bundesrepublik auch langfristig nicht oder nicht wesentlich ausgebaut werden, um 100 bis 300 GW_e zu erreichen.
- (9) Mögliche Probleme bei der Versorgung mit Trennarbeit sind eher politischer als technischer Natur.

B Welt

- (1) Wenn die Kernenergie um 2050 etwa 20 % bis 40 % der weltweiten Primärenergieversorgung übernehmen soll, sind auch weltweit Reaktortypen erforderlich, die wesentlich sparsamer mit Uran umgehen als Leichtwasserreaktoren.
- (2) Mit einer kommerziellen Einführung uransparender Reaktoren (Hochkonverter oder Brüter) ist in weltweitem Maßstab nicht vor 2005 zu rechnen.
- (3) Von der technischen Seite ist auch weltweit eine rechtzeitige Demonstration von verlustarmer Wiederaufarbeitung und Brennelementfabrikation aus Rückführbrennstoff bei größeren Durchsatzmengen unter industriellen Bedingungen maßgebend für den erreichbaren kommerziellen Einführungszeitpunkt uransparender Reaktortypen.
- (4) Mit einem Übergang von der Bestellung gegenwärtiger Reaktortypen zur Bestellung uransparender Reaktoren innerhalb weniger Jahre ist weltweit nicht zu rechnen.
- (5) Bei der untersuchten Entwicklung des weltweiten Kernenergieeinsatzes ist mit einem zeitlich summierten Uranbedarf von mindestens 15 Mio t zu rechnen. Dieser Bedarf würde überwiegend vor 2050 anfallen.
- (6) Der nach 2050 anfallende zeitlich summierte Uranbedarf ist bei Einführung uransparender Reaktoren dann vergleichsweise gering, wenn es sich um Brutreaktoren handelt und wenn die Plutoniumzyklusinventare den Bereich von 4 bis 5 t Pu/GW_e nicht überschreiten.

- (7) Wenn thermische Hochkonverter mit Th-U-233-Zyklus als uransparende Reaktoren eingesetzt werden, werden in einer Übergangszeit zusätzlich zum Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren rund 10 Mio t U benötigt, um das erforderliche Zyklusinventar in solchen Reaktoren zu erzeugen, in denen Thorium als Brutstoff und U-235 als vorherrschender Spaltstoff benutzt werden.
- (8) Für alle realistischen Varianten der Einführung uransparender Reaktortypen wird der jährliche weltweite Uranbedarf in den nächsten 30 oder 40 Jahren weitgehend durch den Gesamtumfang des Kernenergieeinsatzes bestimmt. Bis dahin herrschen Reaktoren mit LWR-typischem Uranbedarf vor. Erst danach können uransparende Reaktortypen die Ansprüche an die Uranversorgung deutlich entlasten.
- (9) Für den untersuchten weltweiten Kernenergieeinsatz liegt der kumulierte Uranbedarf bei realisierbaren Einführungszeitpunkten und Einführungsgeschwindigkeiten für uransparende Reaktorsysteme unterhalb der Summe aus gesicherten, vermuteten und prognostischen Uranvorkommen, die teils gewiß, teils möglicherweise zu akzeptablen Kosten abgebaut werden können. Die Größenordnung dieser Summe beträgt gegenwärtig 20-30 Mio t Uran.
- (10) Eine solche Bilanzierung erfaßt jedoch nicht die wichtigsten Uranversorgungsprobleme, die bei der rechtzeitigen Suche, Entdeckung, Förderung, der mengenmäßigen Bewältigung und der Verteilung bekannter oder möglicher Uranvorkommen liegen.
- (11) Für den untersuchten Kernenergieeinsatz müßten trotz Einführung uransparender Reaktoren im Durchschnitt der nächsten 30 Jahre rund 1/4 Mio t U jährlich als neue Reserven identifiziert werden können.

- (12) Unsicherheiten über den Ausbau der Kernenergie und damit über die Urannachfrage wirken bis in den Bereich der privatwirtschaftlichen Uranprospektion und -exploration zurück. Sie führen zur Zurückhaltung bei entsprechenden Investitionen. Dabei spielen die großen Vorlaufzeiten von Uranprospektion und -exploration eine wichtige Rolle.
- (13) Der rechtzeitigen Ausbeutung von Armerzen (im Bereich 150 ppm U) sind durch Probleme der mengenmäßigen Bewältigung von Förderung und Aufschluß von Gestein und durch damit verbundene Anforderungen an Maßnahmen gegen Umweltschäden Grenzen gesetzt. Das gilt in verstärktem Maße für Armerze im Bereich unter 100 ppm U.
- (14) Auf absehbare Zeit werden nur Südafrika, Kanada, Australien und Niger größere Mengen an Uran netto exportieren können. Verteilungspolitische Gegebenheiten und Entwicklungen können die Schere zwischen Gewinnungskosten und Preisen für Uran weiter öffnen und erhebliche politische Zugeständnisse erforderlich machen.



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 Kapitel 2 erläutert werden.

In Kapitel 3 wird näher auf technisch bedingte Anforderungen an den Versorgungsteil des Brennstoffkreislaufs für die ausgewählten Modelle eingegangen. Längerfristige Begleitumstände der Bedarfsdeckung werden diskutiert. Den Entsorgungsteil behandelt Teil II der Studie.

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 Kapiteln 4 und 5 dieses Beitrages eingegangen. Die Diskussion der Urannachfrage beschränkt sich dabei auf eine beispielhafte Zeitfunktion für den Umfang des weltweiten Kernenergieeinsatzes.

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

2.1 Primärenergienachfrage

Einige Fragen, die in der Studie behandelt werden, erfordern einen Zeithorizont, der weit in das nächste Jahrhundert reicht. Dies gilt insbesondere für Fragen der Uranvorräte, für die Diskussion fortgeschrittener, unransparennder Reaktortypen und für Entsorgungsfragen.

Außerdem sind Aussagen darüber, auf welchen Umfang der Kernenergieeinsatz langfristig wachsen kann, nur vor dem Hintergrund von Vorstellungen über die langfristige Entwicklung der Primärenergienachfrage möglich. Die wichtigsten Bestimmungsgrößen für die Entwicklung der Primärenergienachfrage sind:

- Wirtschaftswachstum
- Struktur der Wirtschaft (Spektrum der produzierten Güter und Dienstleistungen)
- Energiepreise, beeinflusst auch durch Primärenergiereserven
- Technologien der Umwandlung, der Speicherung, des Transports und der Nutzung der Energie (Art und Umfang)
- Energiepolitik
- Umweltbelastungen durch Energieumsatz.

Diese Bestimmungsgrößen sind besonders in der langfristigen Entwicklung schwer abschätzbar, da sie ihrerseits abhängen von den Verhaltensweisen von Institutionen und Einzelpersonen im Inland und von außenpolitischen Gegebenheiten. Daher ist es angebracht, für die im nächsten Jahrhundert erwartbare Primärenergienachfrage eine mit der Zeit wachsende Bandbreite zu betrachten.

Für die Entwicklung der genannten Bestimmungsgrößen wird dabei von folgenden Einschätzungen ausgegangen:

- Energiepreise werden längerfristig überdurchschnittlich wachsen;
- 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;
- mit wachsendem Energieeinsatz steigen regionale Abwärmelastungen und werden schwerer tolerierbar.

Diese Einschätzungen führen zu ständig sinkenden Zuwachsraten der Primärenergienachfrage ⁺⁾ , durch die auch die in Abb. 2.1 dargestellte Bandbreite charakterisiert ist.

Diese Bandbreite der Primärenergienachfrage in der Bundesrepublik Deutschland ist in dieser Studie aufgrund von Annahmen über die Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs an Energie festgelegt worden. Dabei wurden folgende Daten zugrundegelegt:

	Jährlicher Primärenergieeinsatz pro Kopf in kW_{th} ⁺⁺⁾	Wohnbevölkerung in Mio	Primärenergienachfrage in Mio t SKE/a
1975	5,2	61,8	347
2000	8-11 ⁺⁺⁺⁾	57	492-677
asymptotisch ⁺⁺⁺⁺⁾	10-20	60	648-1296

Zwischen diesen Werten wurde mit einer einfachen mathematischen Funktion der Form $E = E_0 \cdot (1 - e^{-\alpha t})$ interpoliert.

-
- +) Meist wird (teilweise auch in dieser Studie) bei derartigen Überlegungen vereinfachend von "Energiebedarf" gesprochen.
 - ++) Ein Primärenergieeinsatz von 1 kW_{th} entspricht $1,08 \text{ t SKE/a}$ oder $31,6 \text{ GJ/a}$.
 - +++) Vergleichszahl für USA: $10,7 \text{ kW}_{\text{th}}$ pro Kopf 1974
 - ++++) Asymptotisch bedeutet: langfristiger Grenzwert, der mit sinkenden Zuwachsraten erreicht und nicht überschritten wird.

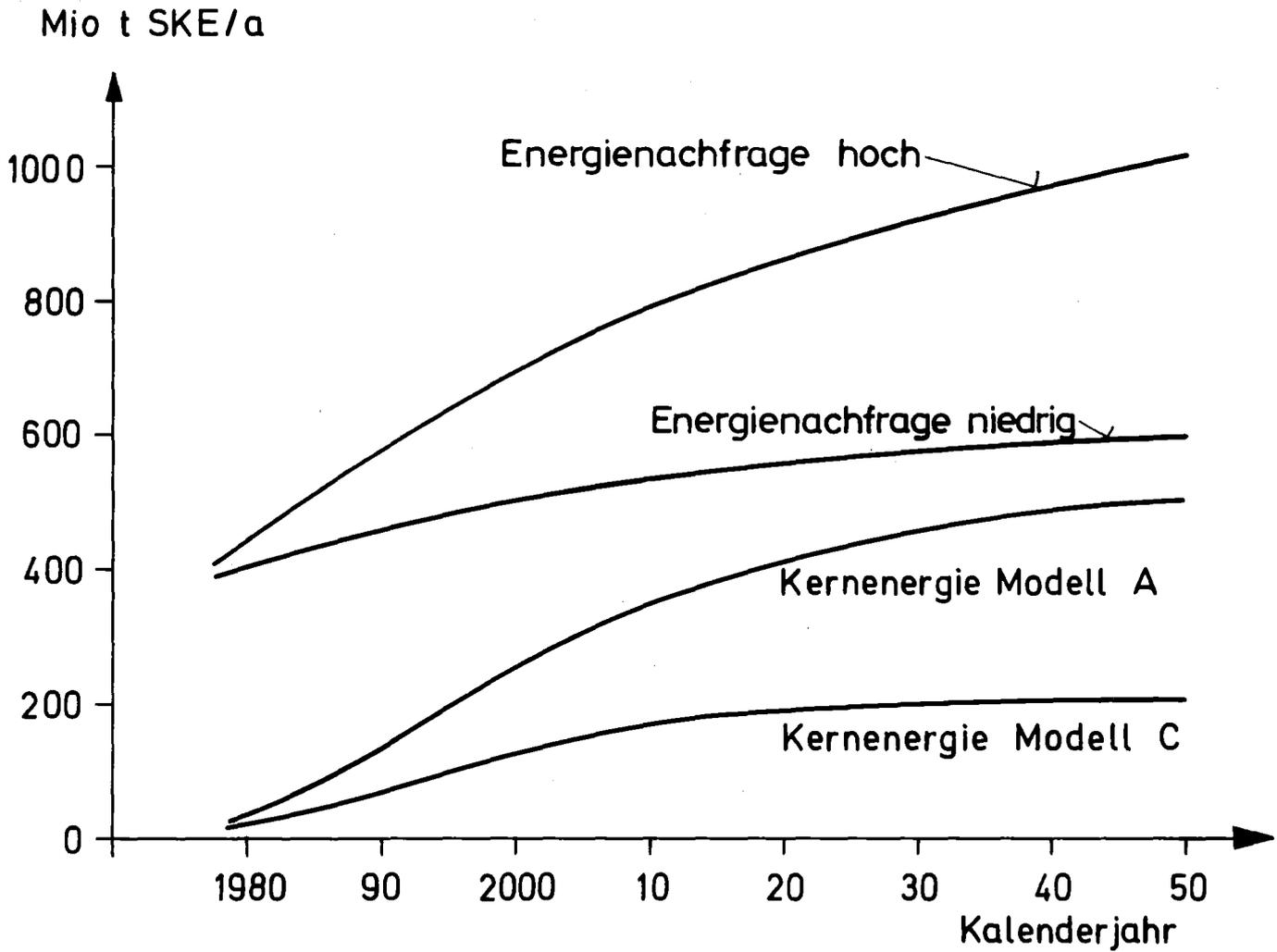


Abb. 2.1 Primärenergienachfrage der Bundesrepublik sowie Kernenergiemodelle A und C

Diese einfache Art der Festlegung der Grenzkurven für die in Abbildung 2.1 dargestellte Spanne der Primärenergienachfrage wurde deshalb gewählt, weil es hier in erster Linie auf die Darstellung eines langfristigen Bezugsrahmens für den Kernenergieeinsatz ankommt. Angaben über die Primärenergienachfrage im nächsten Jahrhundert sind auch bei Verwendung komplexerer Modelle spekulativer Natur. Eine graphische Gegenüberstellung des Primärenergiebandes bis 2000 mit Ergebnissen jüngerer Untersuchungen ist in Anhang 1 zu finden.

Bis zum Jahre 2000 lassen sich Annahmen über das Primärenergiewachstum einigermaßen in Annahmen über das Wirtschaftswachstum übersetzen. Um dies zu erläutern, seien zunächst einige Daten aus neueren Untersuchungen⁺ zur Entwicklung der Energienachfrage genannt.

In diesen Untersuchungen werden für den Zeitraum von 1975-1985 durchschnittliche gesamtwirtschaftliche Wachstumsraten zugrundegelegt, die von 2,8 %/a bis 4,5 %/a reichen. Die entsprechende Spanne für den Zeitraum zwischen 1985 und 2000 reicht von 2 %/a bis 3%/a. Wachstumsraten in jeweils der oberen Hälfte der angegebenen Spannen sind der Zweiten Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung zugrundegelegt worden. Wachstumsraten in der jeweiligen unteren Hälfte der Spannen werden häufig als realistischere Einschätzung der zukünftigen Entwicklung angesehen.

Soweit die erwähnten Untersuchungen nicht nur auf die Endenergienachfrage, sondern auch auf die Primärenergienachfrage eingehen, führen sie gemeinsam zu dem Ergebnis, daß das Primärenergiewachstum hinter dem Wirtschaftswachstum zurückbleiben wird (vgl. Anhang 1). Die Spanne der Differenzen zwischen Primärenergiewachstum und Wirtschaftswachstum reicht von

⁺) /DIW, RWI, EWI (1978), ISP (1978), KFA (1977), NEU, A.D. (1978), MÖLLER, W., STOY, B. (1978)/

- 0,1 %/a bis - 2,0 %/a. Zum Vergleich seien einige historische Daten für die Differenz zwischen Primärenergie- und Wirtschaftswachstum angegeben:⁺⁾

1950 - 1960:	- 2,4 %/a
1960 - 1970:	0
1970 - 1977:	- 1,0 %/a

Wenn man pauschal von einer Wachstumsdifferenz von - 1 %/a ausgeht, läßt sich die in Abbildung 2.1 dargestellte Bandbreite der Primärenergienachfrage bis zum Jahr 2000 in folgende Spannen gesamtwirtschaftlicher Wachstumsraten übersetzen:

	durchschnittliche Wachstumsrate des realen Bruttosozialprodukts in %/a	
	1975-1985	1985-2000
obere Bandgrenze	4,6	3,1
untere Bandgrenze	3,0	2,0

Wenn das Primärenergiewachstum auch langfristig um etwa 1 %/a hinter dem Wirtschaftswachstum zurückbleiben würde, wäre zwischen 2000 und 2050 im Falle der oberen Grenzkurve ein durchschnittliches reales Wirtschaftswachstum von 1,8 %/a, im Falle der unteren Grenzkurve von 1,4 %/a möglich.

Für eine Beurteilung des hier betrachteten relativ geringen Primärenergiewachstums im nächsten Jahrhundert ist darauf hinzuweisen, daß langfristige Angaben über den Primärenergieeinsatz und den Endenergieeinsatz nur grobe Orientierungsdaten für die Energienutzung (etwa für Raumwärme, Transport, Wertschöpfung in der Industrie) sein können. Der Primärenergieeinsatz sagt wenig darüber aus, inwieweit die Energie rationell eingesetzt wird.

⁺⁾ Durchschnittswerte für die angegebenen Zeitspannen

2.2 Modelle des Kernenergieeinsatzes

Bis 1985 ist die Entwicklung weitgehend durch die in fortgeschrittenem Baustadium befindlichen Kernkraftwerksprojekte vorgezeichnet.

Von 1985 bis 2000 wird der Umfang des Kernenergieeinsatzes in erster Linie bestimmt durch:

- Wachstum der Stromnachfrage
- technische und politische Fortschritte bei der Schließung des Brennstoffkreislaufs⁺)
- Störfallverhalten von kerntechnischen Anlagen
- Akzeptanz der Kernenergie durch die Bevölkerung
- Energiepolitik, speziell auch Kohlepolitik⁺⁺).

Ab etwa 2000 werden zusätzliche Einflußgrößen für das Wachstum des Kernenergieeinsatzes mitbestimmend, die bis dahin nur eine untergeordnete Rolle spielen:

- Primärenergienachfrage (nicht nur Stromanteil)
- Preisverhältnisse konkurrierender Primärenergieträger

⁺) Z.B. bei der Realisierung der von der Bundesrepublik Deutschland geplanten Großen Wiederaufarbeitungsanlage (GWA) und bei den Beratungen im Rahmen von INFCE (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation)

⁺⁺) Besonders im Hinblick auf die Aufrechterhaltung der Bergbaukapazität bis zur Klärung der Rolle der Kohle für das nächste Jahrhundert

- technische und wirtschaftliche Bewährung von Kohle und regenerativen Energiequellen zur erforderlichen Substitution von Erdöl und Erdgas
- technische und wirtschaftliche Bewährung des Einsatzes der Kernenergie für nichtelektrische Zwecke.

Rein technisch ist es möglich, daß die Kernenergie einmal in großem Umfang nicht nur zur Strom- und Prozeßwärmeerzeugung bei hohen Temperaturen, sondern auch zur Raumheizung (etwa über Fernwärmenetze) und im Verkehrssektor (etwa über Wasserstoffherzeugung oder mit Elektroautos) eingesetzt wird. Sie könnte dann den größten Teil der Primärenergieversorgung übernehmen. Eine solche Entwicklung ist jedoch u.a. aus wirtschaftlichen, infrastrukturellen und politischen Gründen sowie wegen der Nachteile einer stark einseitigen Energieversorgung sehr unwahrscheinlich und wird in dieser Studie nicht in Betracht gezogen.

Auf der anderen Seite sind für den Umfang des Kernenergieeinsatzes in der Bundesrepublik unter gewissen Bedingungen auch Entwicklungen unterhalb der im folgenden diskutierten Bandbreite möglich. In einem solchen Fall würde es sich allerdings kaum noch um einen "großtechnischen" Einsatz der Kernenergie handeln.

Die in dieser Studie betrachtete Spanne bezüglich des Umfangs des Kernenergieeinsatzes im nächsten Jahrhundert läßt sich durch folgende Angaben charakterisieren:

- Kohle und regenerative Energiequellen ⁺⁾ übernehmen einen Teil der erforderlichen Substitution von Erdöl und Erdgas.
- Kernenergie wird nicht nur, aber überwiegend zur Stromerzeugung eingesetzt und entwickelt sich zur vorherrschenden Primärenergiequelle für die Stromerzeugung.

⁺⁾ Hierzu zählen auch Sekundärenergieträger aus Sonnenenergie (z.B. Wasserstoff), die als Importe aus sonnenbegünstigten Ländern langfristig eine wichtige Rolle spielen können.

- Der Stromanteil an der Endenergie (13,5 % in 1976) wird weiter wachsen und im nächsten Jahrhundert 20 % bis 35 % erreichen.
- Das Verhältnis zwischen Endenergie- und Primärenergieeinsatz wird von gegenwärtig 67 % auf 50 % bis 60 % im nächsten Jahrhundert abnehmen.

Bei dieser Charakterisierung verbleibt jedoch eine erhebliche Spanne für den Umfang des Kernenergieeinsatzes, die durch die nachfolgend durch Szenarien erläuterten Modelle A, B und C (vgl. Abb. 2.1) umrissen wird.

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 Abschnitt 2.1 beschriebenen 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 Jahres-

durchschnitt etwa 4 Kraftwerksprojekte (Leichtwasserreaktoren) bis zum Baubeginn gebracht werden. Die installierte Kernenergiekapazität steigt auf 25 GW_e 1985 und 85 GW_e im Jahre 2000. Die Primärenergienachfrage bewegt sich langfristig im mittleren oder unteren Bereich der beschriebenen Bandbreite. Der Stromanteil an der Endenergie steigt bis auf 25 % oder 30 %, die Kernenergie übernimmt schließlich 70 % davon. Die installierte Kernenergiekapazität steigt langfristig auf etwa 500 GW_{th} (äquivalent zu 200 GW_e).

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_e in 1985 und 57 GW_e 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.

Die Modelle A, B und C sind in Abb. 2.2 dargestellt. Einzelannahmen, die dem Verlauf der Kurven zugrundeliegen, sind im Anhang 2 zu finden. Der für nichtelektrische Zwecke veranschlagte Einsatz von Kernenergie wurde über Wärmeäquivalente in eine entsprechende elektrische Kapazität umgerechnet und zur veranschlagten Stromerzeugungskapazität addiert.

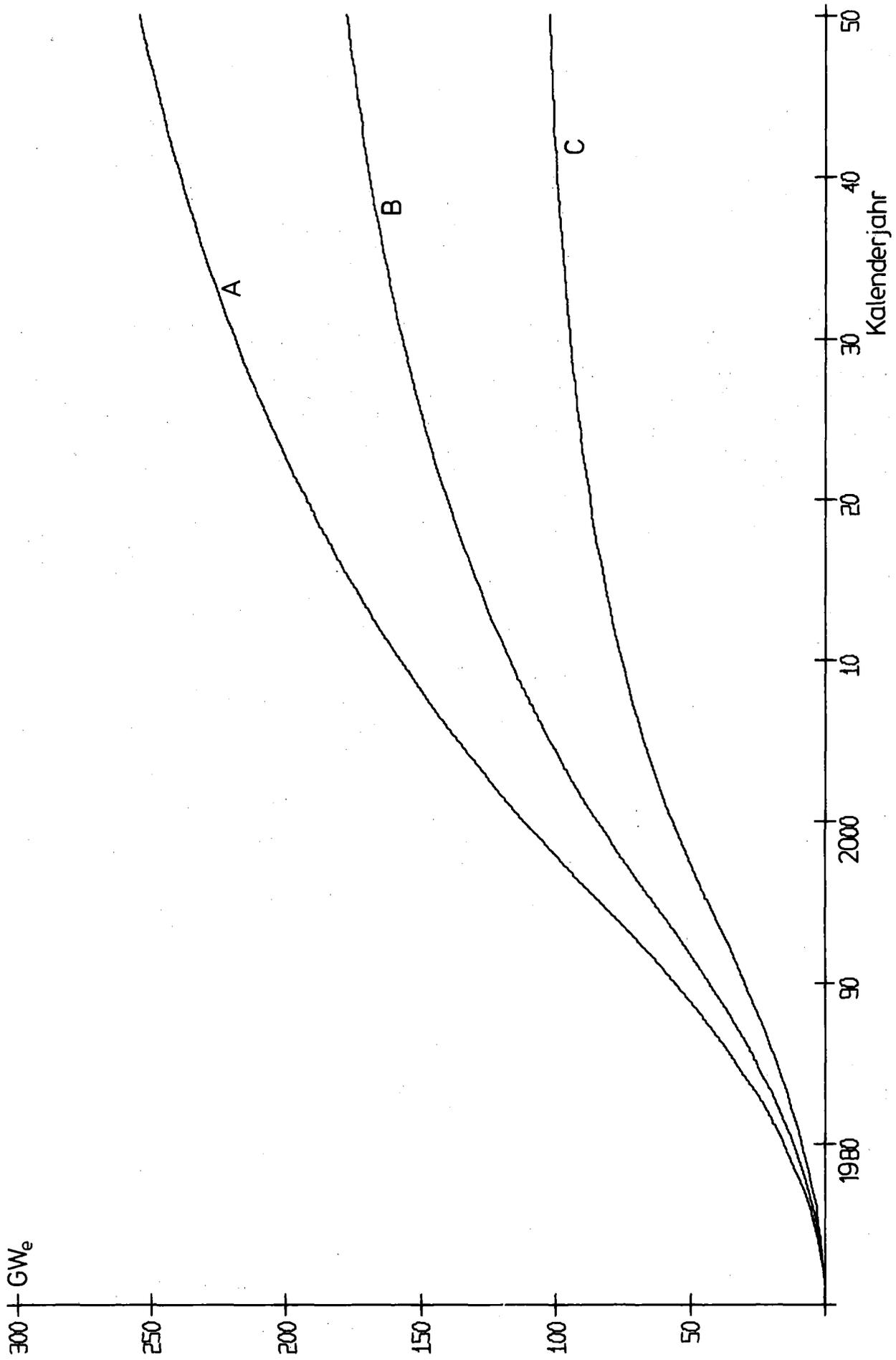


ABB- 2.2 INSTALLIERTE KRAFTWERKSKAPAZITÄT - MODELLE A,B,C

Bemerkungen zu den Modellen

Wegen der Unsicherheiten in den zu Beginn von Abschnitt 2.2 beschriebenen Einflußgrößen besteht keine feste Zuordnung zwischen den beschriebenen Kernenergiemodellen und bestimmten Primärenergieentwicklungen. Jedoch ist die Primärenergienachfrage, jedenfalls im nächsten Jahrhundert, eine der wichtigsten Bestimmungsgrößen für den Umfang des Kernenergieeinsatzes.

Der glatte und ähnliche Verlauf der Modellkurven A, B und C ist rechenmethodisch bedingt. Es wurde nicht versucht, Feinheiten im Zeitverlauf zu beschreiben.

Angesichts der gestiegenen Bau- und Genehmigungszeiten ist Modell A bis 1990 praktisch nicht mehr zu realisieren (vgl. Anhang 2 sowie Teil III, Kapitel 3 der Studie). Trotzdem wird Modell A in die Untersuchung einbezogen, um die längerfristig betrachtete Bandbreite nach oben hin abzugrenzen.

Modell B entspricht bis 1990 etwa dem Zubau der Kernkraftwerkskapazität, der in der Zweiten Fortschreibung des Energieprogramms der Bundesregierung genannt wird.

Modell C würde 1985 (18 GW_e) dann verwirklicht, wenn nur die bereits im Bau befindlichen Reaktoren (außer Wyhl und Brokdorf) bis dahin in kommerziellen Betrieb gehen könnten.

Modell C entspricht am ehesten heute erkennbaren Tendenzen bei wichtigen Einflußgrößen.

2.3 Annahmen zur Einführung uransparender Reaktortypen

In diesem Jahrhundert werden kommerziell überwiegend Leichtwasserreaktoren eingesetzt. Bei dem betrachteten Kernenergieeinsatz wird es längerfristig erforderlich sein, den Uranbedarf durch Einführung fortgeschrittener Reaktoren⁺) zu senken. Wie rasch das geschehen kann, hängt vom Einführungszeitpunkt und der Einführungsgeschwindigkeit für die uransparenden Reaktortypen ab.

Betrachtet wurden die beiden Einführungszeitpunkte 1990 und 2000. Bezüglich der Einführungsgeschwindigkeit wurde unterstellt, daß der Anteil der Leichtwasserreaktoren an den Kernkraftwerksaufträgen exponentiell abnimmt. Der Exponent wurde dabei so gewählt, daß die Einführungskurven der uransparenden Reaktoren nach dem Einführungszeitpunkt etwa mit den Modellkurven für die Leichtwasserreaktor-Kapazität zwischen 1970 und 1980 übereinstimmen. Dies ist in den Abbildungen 2.3 bis 2.5 zu erkennen, in denen die Zeitfunktionen sowohl für die Leichtwasserreaktoren als auch für die uransparenden Reaktoren für die Modelle A, B und C dargestellt sind⁺⁺⁾.

Beim Einführungszeitpunkt 2000 wäre die installierte Kapazität uransparender Reaktoren für Modell A im Jahre 2005 etwa 4 GW_e. Die entsprechenden Reaktoren müssen bis 1995 in Auftrag gegeben sein. Möglicherweise ist bis zur Auftragserteilung für uransparende Reaktoren eine für einen kommerziellen Durchbruch ausreichende Demonstration der Wiederaufarbeitung und Refabrikation von Schnellbrüter- oder Hochtemperaturreaktor-Brennstoff in der Bundesrepublik noch nicht erfolgt (vgl. Abschnitt 4.5). Die Auftragsentscheidung für eine begrenzte Anzahl uransparender Reaktoren könnte jedoch gestützt werden durch eine gewisse staatliche Risikoabdeckung und/oder eine Garantie für die Schließung des Brennstoffkreislaufs im Ausland.

+) In Betracht kommen hier in erster Linie Schnelle Brutreaktoren (SBR) und Hochtemperaturreaktoren (HTR) mit hohen Konversionsraten. In diesem Teil der Studie wird der Einsatz von SBR und HTR alternativ untersucht, d.h. als Nachfolger der LWR werden einerseits nur SBR, andererseits nur HTR betrachtet.

++) Die Bezeichnungen der Modellvarianten wurden so gewählt, daß der Index 1 dem Einführungszeitpunkt 1990, der Index 2 dem Einführungszeitpunkt 2000 entspricht.

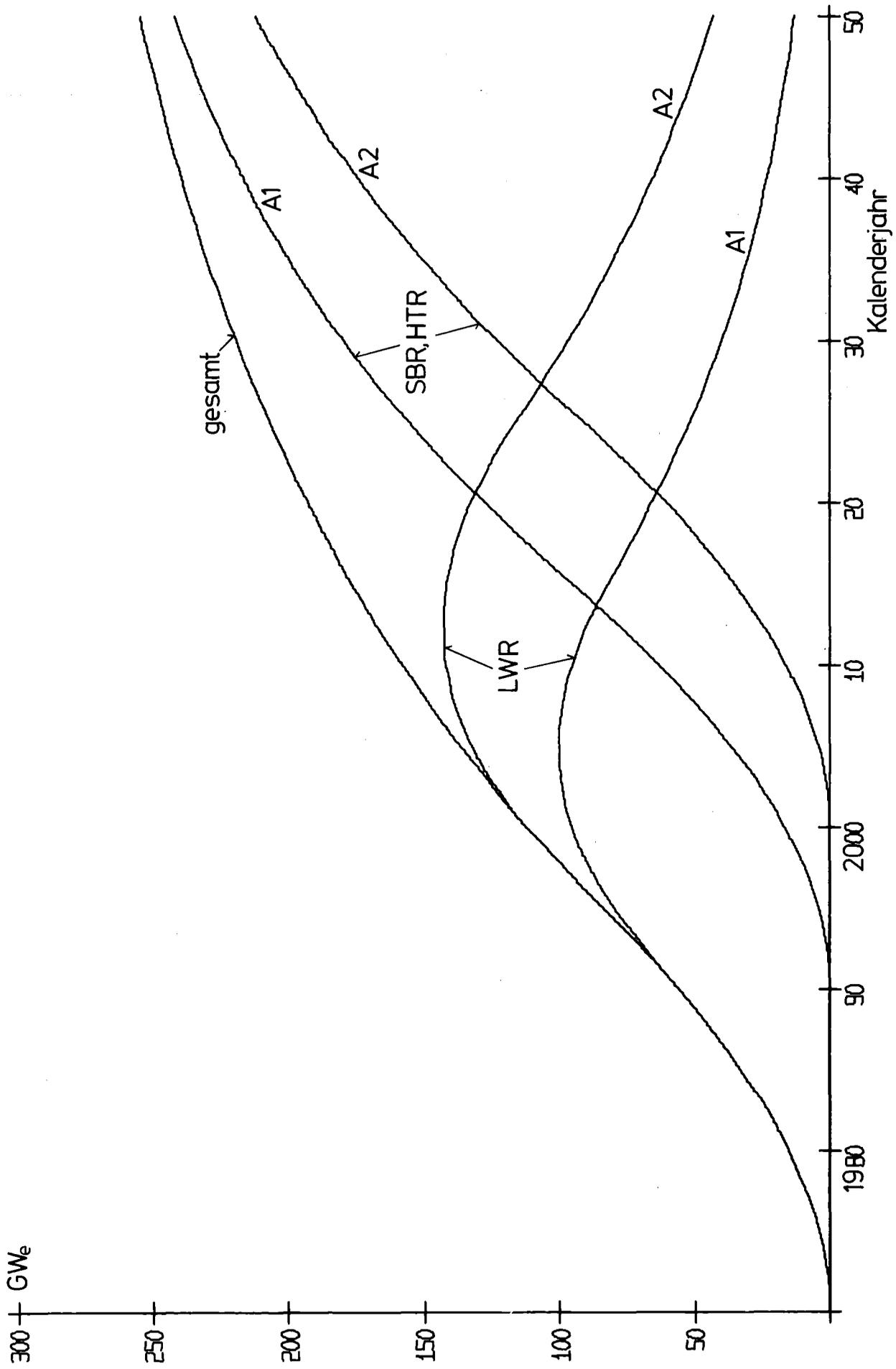


ABB. 2.3 INSTALLIERTE KRAFTWERKSKAPAZITÄT - MODELL A MIT VARIANTEN

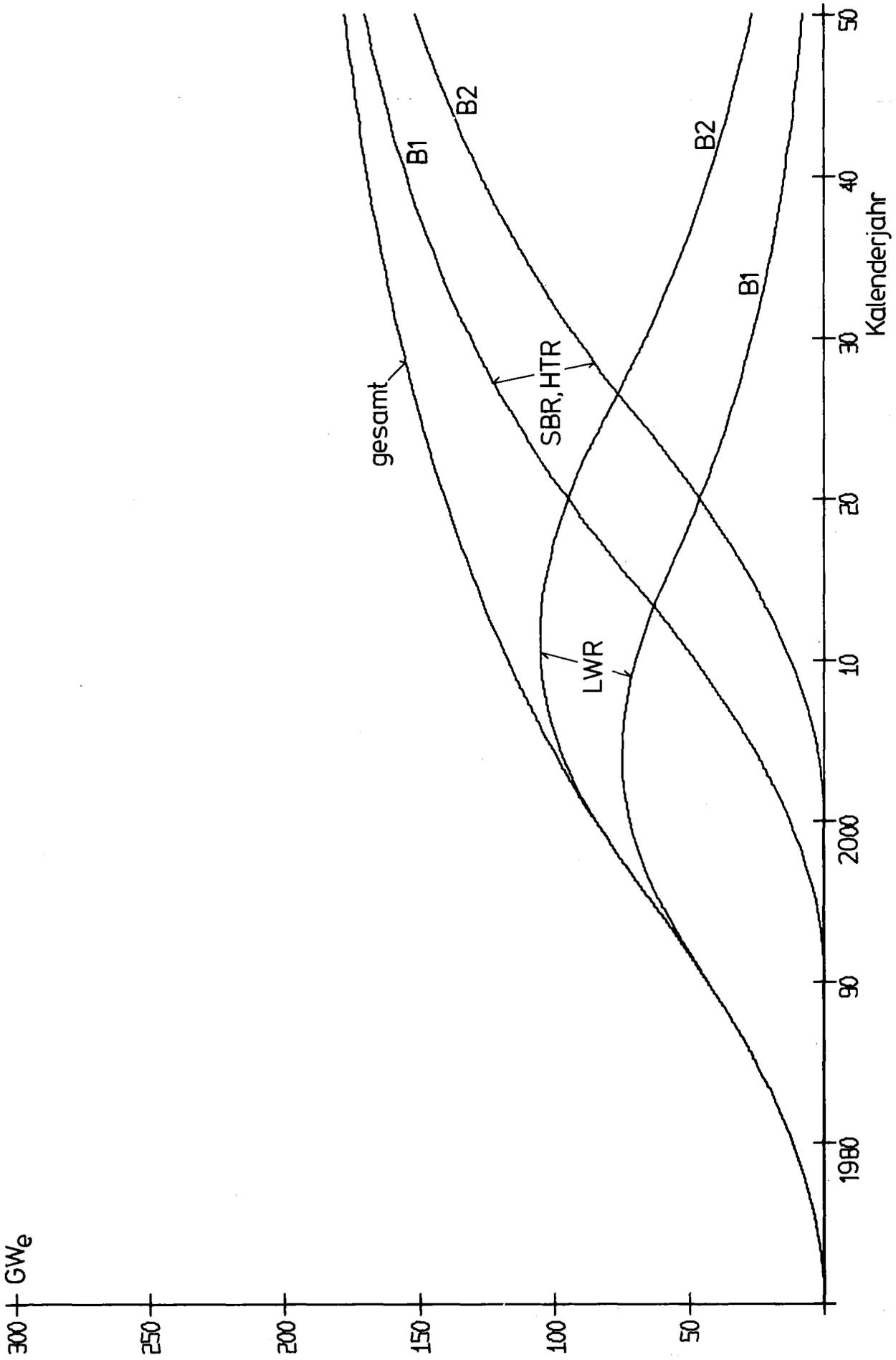


ABB. 2.4 INSTALLIERTE KRAFTWERKSKAPAZITÄT - MODELL B MIT VARIANTEN

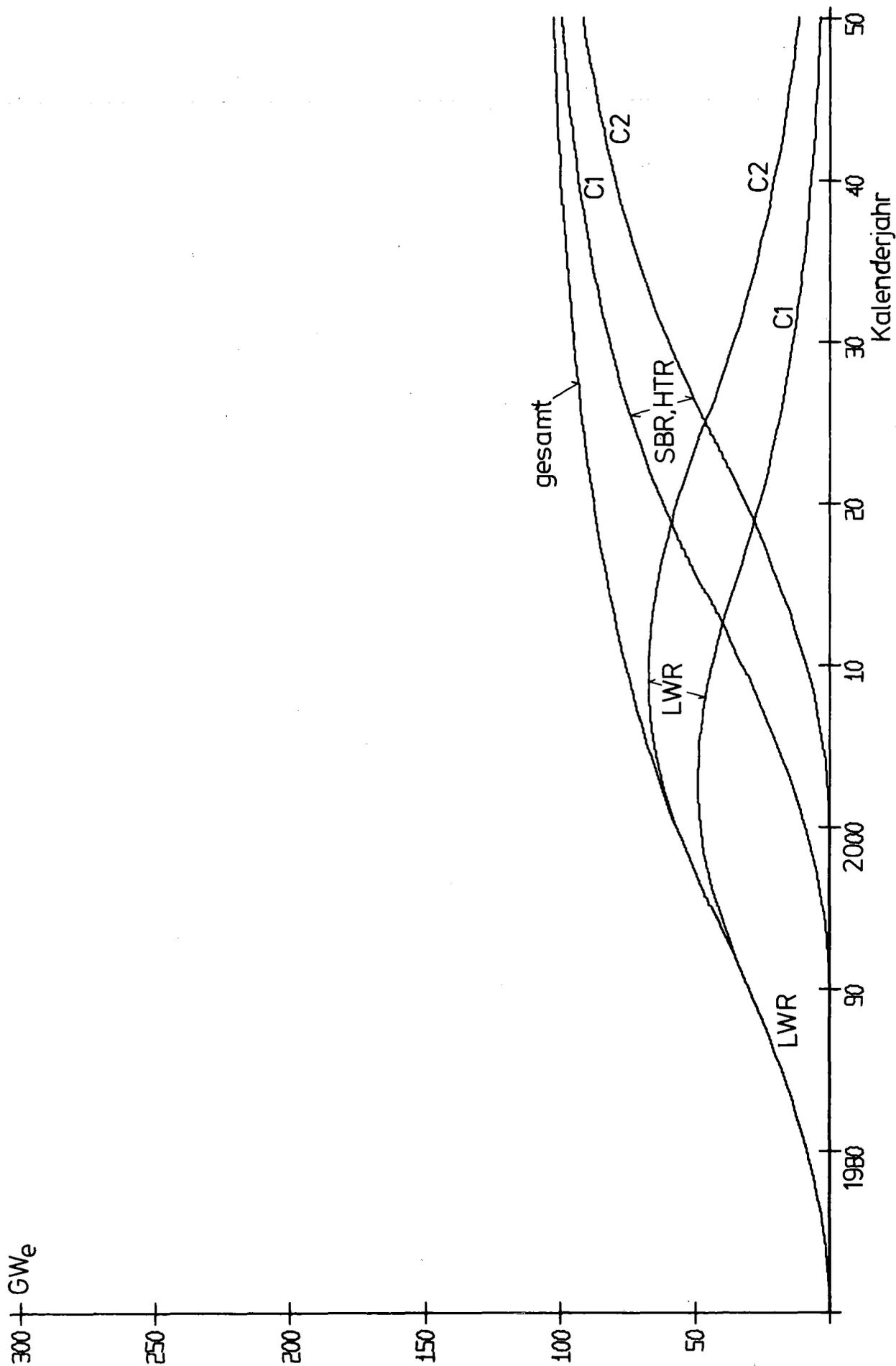


ABB. 2.5 INSTALLIERTE KRAFTWERKSAPAZITÄT - MODELL C MIT VARIANTEN

Der parallel betrachtete Einführungszeitpunkt 1990 dürfte als unrealistisch anzusehen sein. Er wurde ausgewählt, um Vergleiche mit anderen Studien zu erleichtern.

In Abschnitt 4.5 werden Gründe aufgeführt, nach denen auf weltweiter Ebene eine kommerzielle Einführung uransparender Reaktoren vor 2005 unrealistisch ist. Dies ist kein Widerspruch zu dem für die Bundesrepublik Deutschland betrachteten Einführungszeitpunkt 2000, da es sich hier um eine Einführungsgeschwindigkeit handelt, nach der bis 2005 nur 2 oder 3 Reaktorblöcke fertiggestellt werden müssen. Das ist noch nicht als kommerzieller Durchbruch anzusehen.

3. Zubau von Reaktoren und Brennstoffversorgung (Bundesrepublik Deutschland)

3.1 Zubau von Reaktoren

Zur Ausweitung der installierten Reaktorkapazität und zum Ersatz von Reaktoren nach Ablauf ihrer Lebensdauer sind jährlich Reaktorerstellungen erforderlich, die in den Abbildungen 3.1 bis 3.3 für die hier betrachteten Modellentwicklungen in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt sind.

Die Abbildungen verdeutlichen zugleich, daß sich die betrachtete Einführungsgeschwindigkeit so charakterisieren läßt, daß der Anteil der Leichtwasserreaktoren an der gesamten Erstellungsrate 9 bis 14 Jahre nach dem nominellen Einführungszeitpunkt für uransparende Reaktoren auf etwa 50 % abgesunken ist.

Die gegenwärtige Erstellungskapazität in der Bundesrepublik beträgt etwa $8 \text{ GW}_e/\text{a}$ und würde damit für Modell B (vgl. Abbildung 3.2) auch langfristig zur Deckung des Inlandsbedarfs ausreichen. Für Modell C würde die Beibehaltung der gegenwärtigen Baukapazität auch langfristig Exportreserven enthalten. Für Modell A müßte die Baukapazität um 2010 zur Deckung des Inlandsbedarfs erweitert werden.

Bei keiner der betrachteten Modellentwicklungen ist also eine deutliche Ausweitung der Erstellungskapazität bis 2000 erforderlich.

Eine zeitliche Rückverschiebung der in den Abbildungen 3.1 bis 3.3 dargestellten Erstellungsraten um 8 bis 10 Jahre (Bauzeit plus Zeit zwischen Auftragsvergabe und Baubeginn) würde Zeitkurven über den Umfang der in GW_e gemessenen jährlichen Aufträge geben, die zur Verwirklichung der Modellentwicklungen erforderlich sind. So läßt sich z.B. aus Abbildung 3.2 (nach Zeitverschiebung) ablesen, daß zu einer Verwirklichung von Modell B Anfang der 80er Jahre etwa 4 GW_e jährlich in Auftrag gegeben werden müßten.

3.2 Brennelementfabrikation

Die Fabrikationskapazität für Leichtwasserreaktor-Brennelemente betrug 1975 in der Bundesrepublik 670 t SM^{+) /a. Tabelle 3.1 zeigt den für die Modelle A, B und C erforderlichen Bedarf an Fabrikationskapazität für Leichtwasserreaktoren für drei ausgewählte Zeitpunkte. Die zugrundegelegten Reaktordaten sind in Anhang 3 aufgeführt. Wenn uransparende Reaktoren im Jahre 2000 eingeführt werden, erreicht die erforderliche Fabrikationskapazität um 2010 ein Maximum, das ebenfalls in Tabelle 3.1 angegeben ist.}

Tabelle 3.1: Erforderliche Fabrikationskapazität für Leichtwasserreaktor-Brennelemente in t SM/a

	Modell A	Modell B	Modell C
1985	1360	1050	730
2010	4000	2900	1850
2030	2500	1700	870

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

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

^{+) SM: Schwermetall (Brennstoff + Brutstoff)}

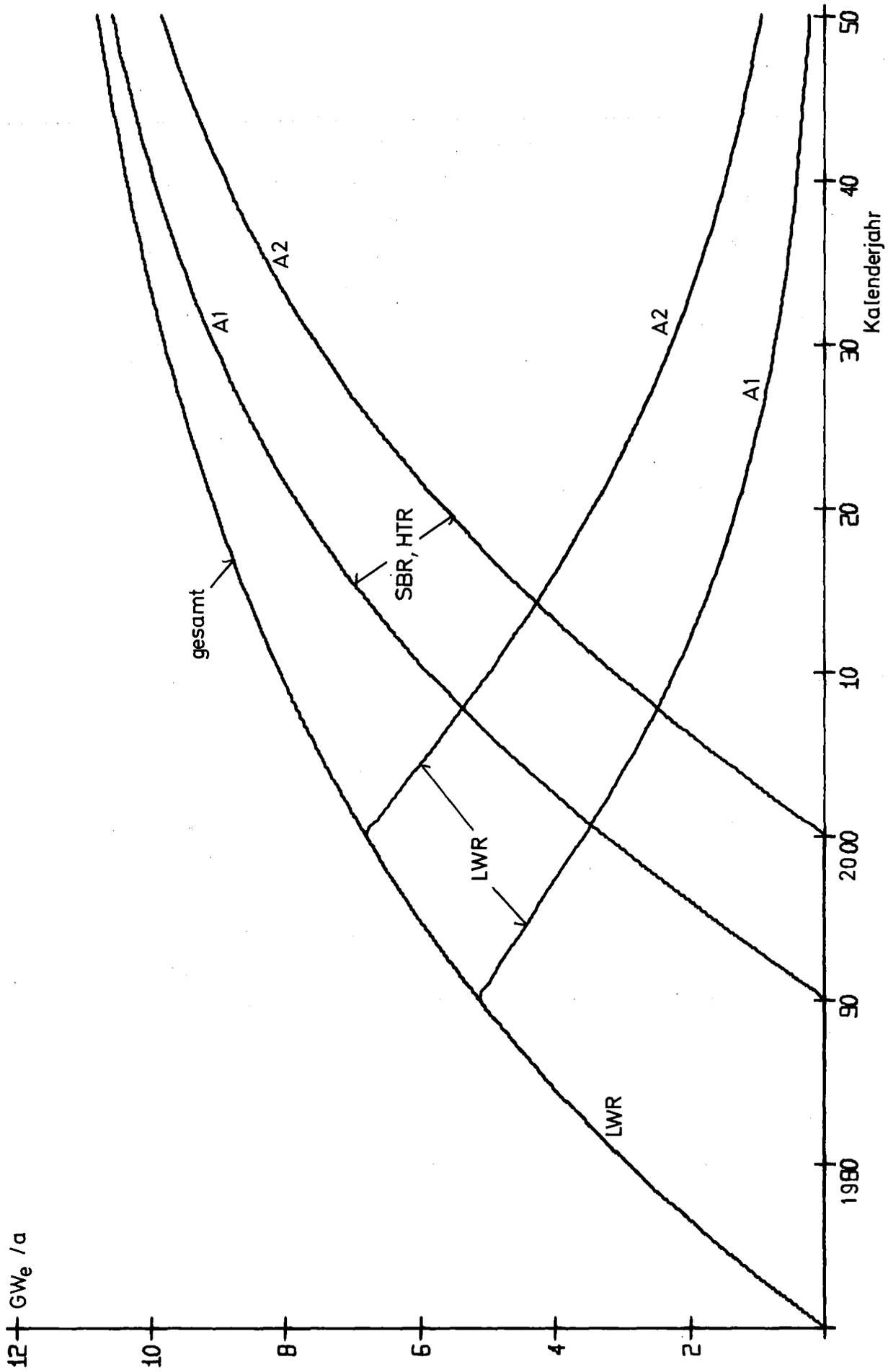


ABB. 3.1 JÄHRLICHE ERSTELLUNGSRATE - MODELL A MIT VARIANTEN

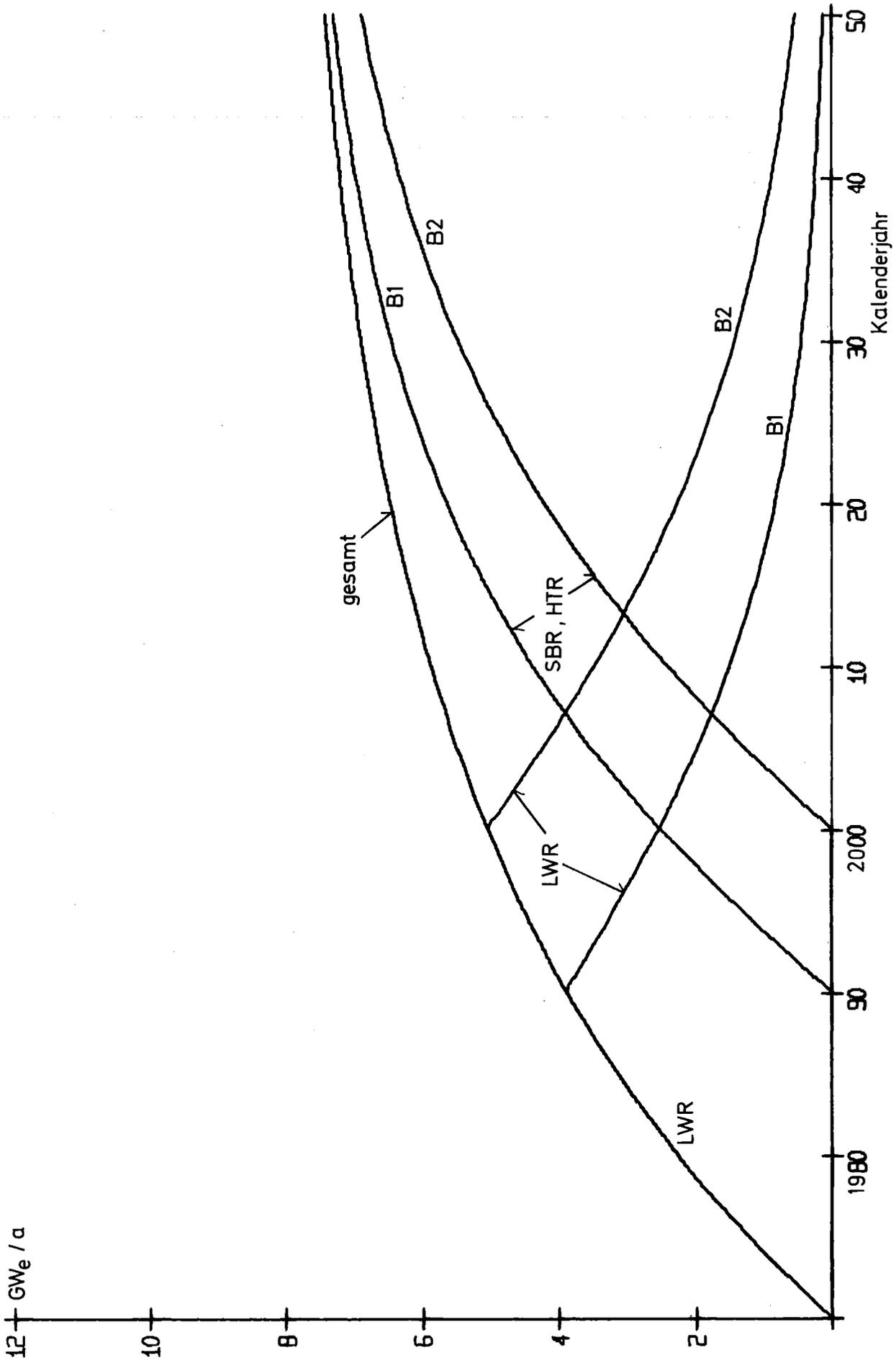


ABB. 3.2 JÄHRLICHE ERSTELLUNGSRATE - MODELL B MIT VARIANTEN

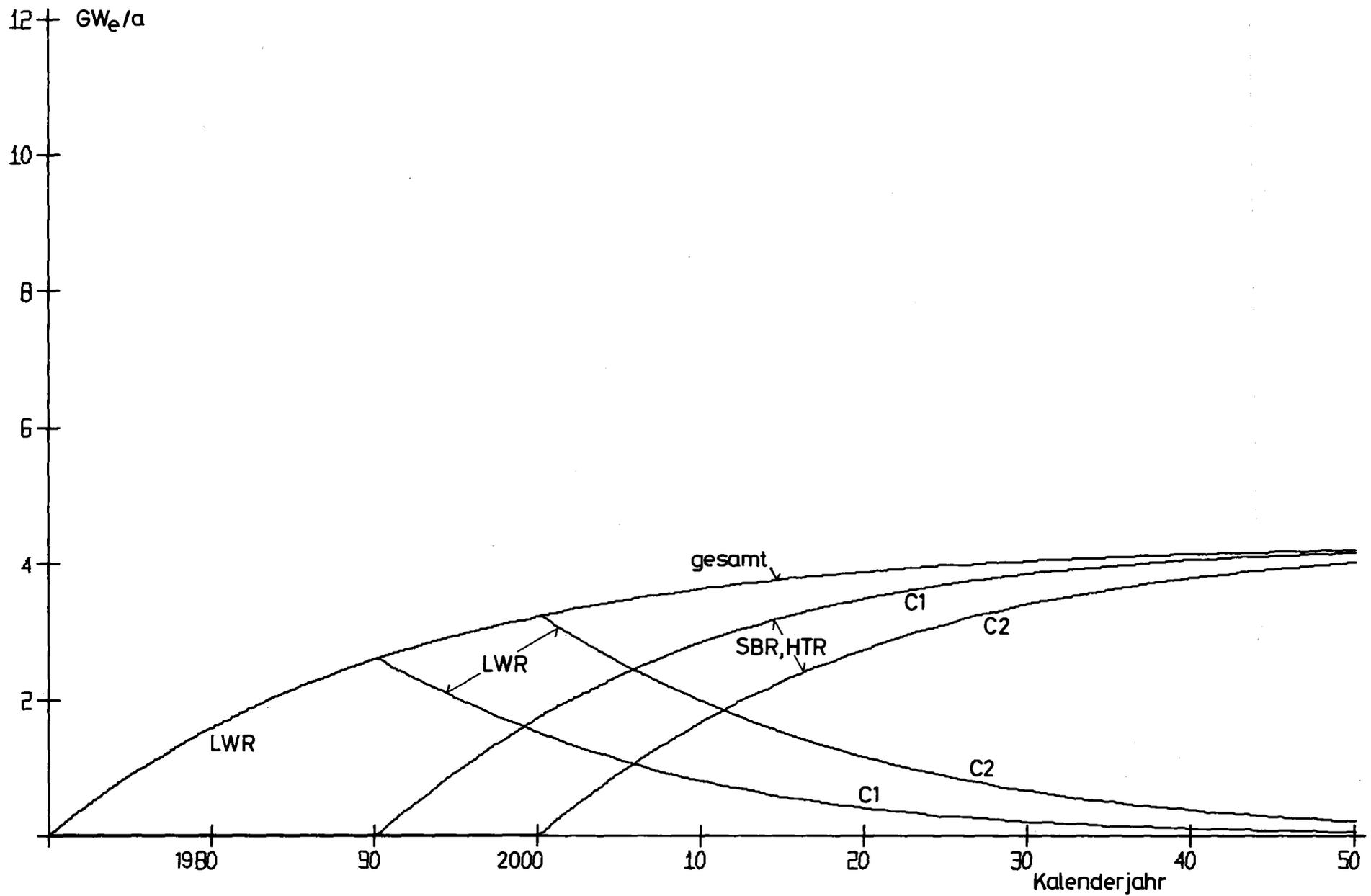


ABB. 3.3 JAEHRLICHE ERSTELLUNGSRATE - MODELL C MIT VARIANTEN

Die Entwicklung der Fabrikation von Brennelementen aus Rückführbrennstoff mit Plutonium oder U-233 zum Einsatz in uransparenen Reaktoren wird noch erhebliche Zeit bis zur kommerziellen Reife benötigen (vgl. Abschnitt 4.3).

Die Demonstration der kommerziellen Reife ist (wie auch die der Wiederaufarbeitung) einer der durch erforderliche technische Entwicklung bedingten zeitlichen Engpässe, die den Einführungszeitpunkt uransparenender Reaktoren bestimmen. Vor einer solchen Demonstration sind Entscheidungen für eine größere Zahl von Reaktorbestellungen für uransparende Reaktortypen nicht zu erwarten.

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

Bei inländischer Fabrikation von Brüterbrennstoff reicht eine kleintechnische Kapazität einer Prototypanlage zur Fabrikation von etwa 20 t SM/a für Core-Brennstoff plus Brutstoff für axialen und radialen Brutmantel aus, um Demonstrationsbrüter mit einer Kapazität von 1,5 GW_e (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. Mengemäßig ist das immer noch wesentlich weniger als die dann erforderliche Fabrikation von Brennstoff für Leichtwasserreaktoren. Da der Core-Brennstoff⁺ für SBR (wie auch der Rückführbrennstoff von Hochtemperaturreaktoren) erhebliche Strahlenschutzanforderungen bei der Fabrikation stellt, ist ein einfacher Vergleich der verarbeiteten Tonnen SM jedoch irreführend.

⁺) Etwa die Hälfte der nachzuladenden Schwermetallmenge entfällt auf Core-Brennstoff.

Bei 200 t SM/a müßten täglich rund 300 kg Corebrennstoff fabriziert und über 30 kg spaltbares Plutonium verarbeitet werden.

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.

Sie gehören zu den Gründen für eine möglichst zentrale Ansiedlung der Fabrikation an einem Standort, an dem zugleich die Entsorgung zentralisiert ist. In diesem Fall könnten für Leichtwasserreaktor-Brennelemente ausgelegte und dezentral bestehende Fabrikationsanlagen nicht einfach zur Fabrikation mit Rückführbrennstoff übergehen.

Der Tabelle 3.2 ist zu entnehmen, auf welche Werte die jährliche Fabrikation von Schnellbrüter-Brennstoff langfristig (um 2100) bei den betrachteten Modellen A, B und C steigen müßte, wenn dann nur SBR eingesetzt wären. Für das Modell B 2 ergibt sich ein Faktor 14 gegenüber dem erwähnten Wert von 200 t SM/a in 2005. Tabelle 3.2 enthält auch Angaben für den hypothetischen Fall, daß um 2100 entweder nur das HTR-Vorbrüter-Nahebrüter-System oder nur Leichtwasserreaktoren eingesetzt würden.

Tabelle 3.2: Langfristig erforderliche Brennelementfabrikation in t SM/a⁺)

	Modell A	Modell B	Modell C
SBR ⁺⁺)	4200	2800	1500
HTR-System ⁺⁺⁺)	8100	5300	2900
LWR	7200	4800	2600

+) Lastfaktor 0.7

++) Einschl. Brutelemente

+++) Abbrand 24 GWd/t SM, Reaktordaten nach Anhang 3

3.3 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⁺) vor. Davon entfallen 51 % auf Verträge mit der US-ERDA, 25 % auf Verträge mit der Sowjetunion und 23 % auf Verträge mit der URENCO, an der Großbritannien, die Niederlande und die Bundesrepublik beteiligt sind. Nachstehend ist der Bedarf an Trennarbeit aufgeführt, der ab 1978 bis 1990 für die Modellentwicklungen A, B und C anfallen würde⁺⁺⁾:

Modell A	55 · 10 ³ t UTA
Modell B	40 · 10 ³ t UTA
Modell C	30 · 10 ³ t UTA

Für Modell C würde also die abgesicherte Trennarbeit den vollen Bedarf bis über 1990 hinaus decken. Für Modell B wären bereits 87 % des Bedarfs bis 1990 abgesichert. Abbildung 3.4 zeigt die längerfristige Entwicklung des jährlichen Leichtwasserreaktor-Bedarfs an Trennarbeit für die Bundesrepublik, die sich für die betrachteten Modellentwicklungen ergibt. Die Kurven für kommerzielle Einführung uransparender Reaktortypen im Jahre 1990 sind wegen des frühen Einführungszeitpunktes unrealistisch, verdeutlichen aber den starken Einfluß des Einführungszeitpunktes auf den längerfristigen Bedarf an Trennarbeit. Der in der Abbildung dargestellte Bedarfsfall etwa 10 Jahre nach Einführung uransparender Reaktoren würde sich dann zeitlich verschieben, wenn es sich bei diesen Reaktoren zunächst um das HTR-Nahebrütersystem handelt. Zugleich läge das Maximum des gesamten Trennarbeitsbedarfs für Leichtwasserreaktoren und Hochtemperaturreaktoren höher als im

⁺) UTA: Urantrennarbeitseinheit, gewöhnlich in kg oder in t angegeben

⁺⁺⁾ Lastfaktor 0,7, Vorlaufzeit für Erstkerne 2 Jahre, Vorlaufzeit für Nachladungen 1 Jahr. Sonstige Daten nach Anhang 3

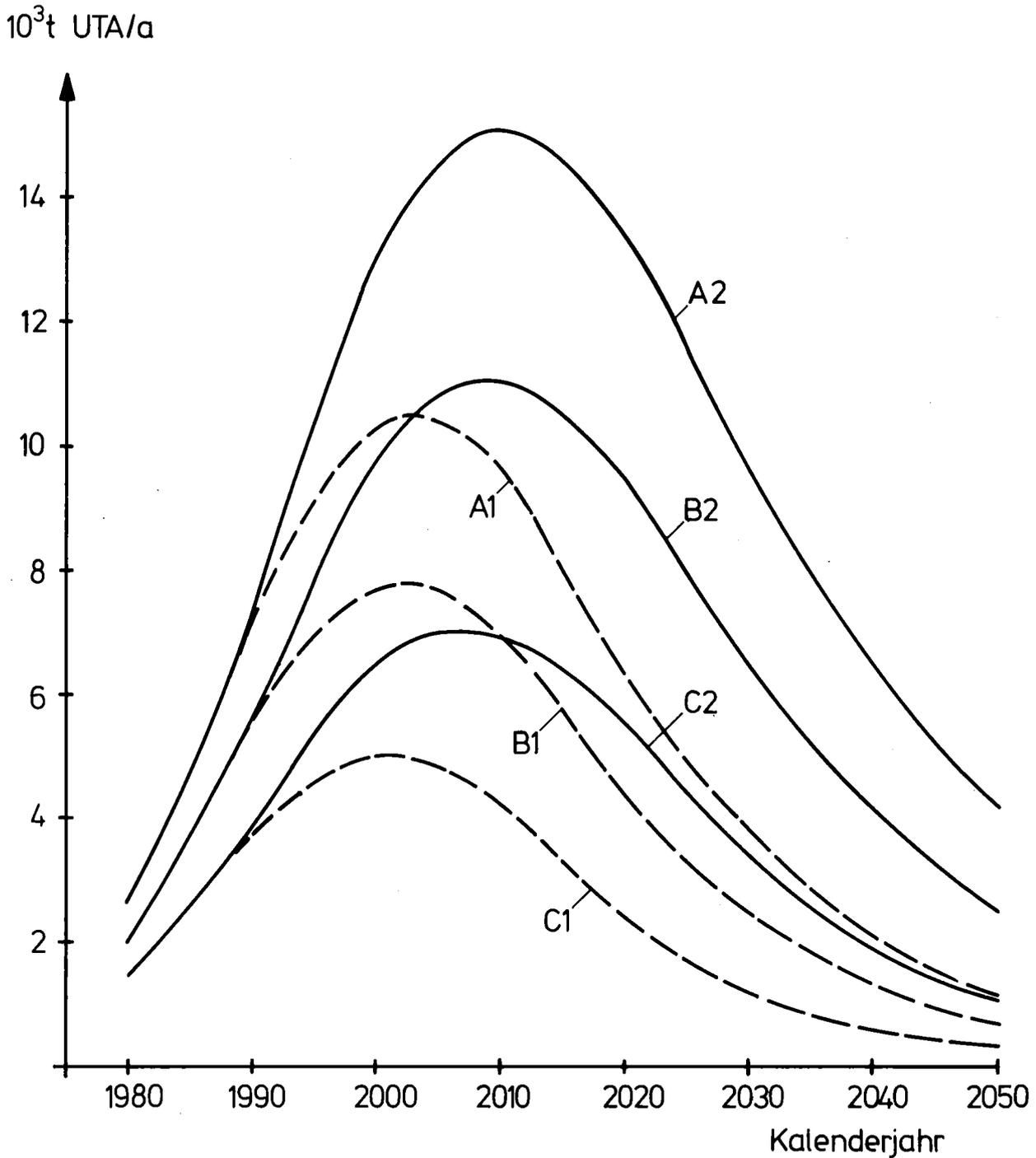


Abb. 3.4 Jährlicher Bedarf an Trennarbeit für LWR für 6 Modellentwicklungen bei Einführung uransparender Reaktoren.

----- Einführungszeitpunkt 1990
————— Einführungszeitpunkt 2000

SBR-Fall. Für dieses System /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.

Für die künftige nationale und internationale Anpassung der Kapazität von Anreicherungsanlagen an die Bedarfssituation wirkt sich günstig aus, daß die Projektlaufdauer von Auftrag bis Betriebsbeginn für Erweiterungen bestehender Anlagen oder für den Bau neuer Anlagen bei Gaszentrifugen ⁺⁾ kürzer ist als für den Bau von Reaktoren.

Welche Trennarbeitskapazität für die betrachteten Modellentwicklungen künftig in der Bundesrepublik installiert werden müßte, ist schwer abzuschätzen. Für die Uran-Lieferländer ist es wirtschaftlich attraktiv, Uran gleich in angereicherter Form zu verkaufen. Für Kanada und Australien sind entsprechende Bestrebungen bekannt, für Südafrika zu vermuten. Dies dürften längerfristig die drei wichtigsten Uran-Lieferländer sein (vgl. Abschnitt 5).

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.

⁺⁾ 3 Jahre Bauzeit für 1000 t UTA/a /BRAUN, R., u.a. (1974)/

3.4 Uranbedarf

Der zu den ausgewählten Modellen (Abbildungen 2.3 bis 2.5) gehörende Uranbedarf für die Leichtwasserreaktoren (Uranzyklus, ohne Rückführung von Plutonium) ist in den Abbildungen 3.5 bis 3.10 graphisch dargestellt. Dabei sind die Zeitkurven für die Erstkerne und den Nachladebedarf getrennt aufgeführt. Außerdem ist die Menge des Resturans aus entladendem Brennstoff dargestellt, die zur Rückführung in Leichtwasserreaktoren zur Verfügung steht.

Die Abbildungen zeigen, daß der größte jährliche Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren für diese Modelle bei Einführungszeitpunkt 2000 der uransparenden Reaktoren um 2010 anfällt. Er liegt zwischen etwa 20 000 t U_{nat} (Modell A) und 8000 t U_{nat} (Modell C), wenn U-235 rückgeführt wird. Um 2030 ist dann der jährliche Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren bereits auf etwa die Hälfte des Maximalwertes abgesunken. Gegenwärtig (1978) liegt der jährliche Bedarf bei 1000 t U_{nat} pro Jahr (ohne Rückführung).

Über den zeitlich summierten Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren gibt Tabelle 3.3 Auskunft. Sie enthält Angaben für die Einführungszeitpunkte 1990, 2000 und 2010. Die Zahlenwerte demonstrieren die starke Abhängigkeit des kumulierten Uranbedarfs der Leichtwasserreaktoren vom Einführungszeitpunkt der uransparenden Reaktoren. Würde man bis 2100 nur Leichtwasserreaktoren installieren, so wäre der kumulierte Uranbedarf der LWR bei Modell B mit etwa 2,8 Mio t U_{nat} um einen Faktor 4,5 größer als bei Einführung uransparender Reaktoren in 2000. Damit würde die Bundesrepublik mehr als die Hälfte der gegenwärtig bekannten und zusätzlich vermuteten Uranvorräte^{+) der westlichen Welt (vgl. Abschnitt 5.1) beanspruchen.}

^{+) Bei Gewinnungskosten \leq 130 §/kg U}

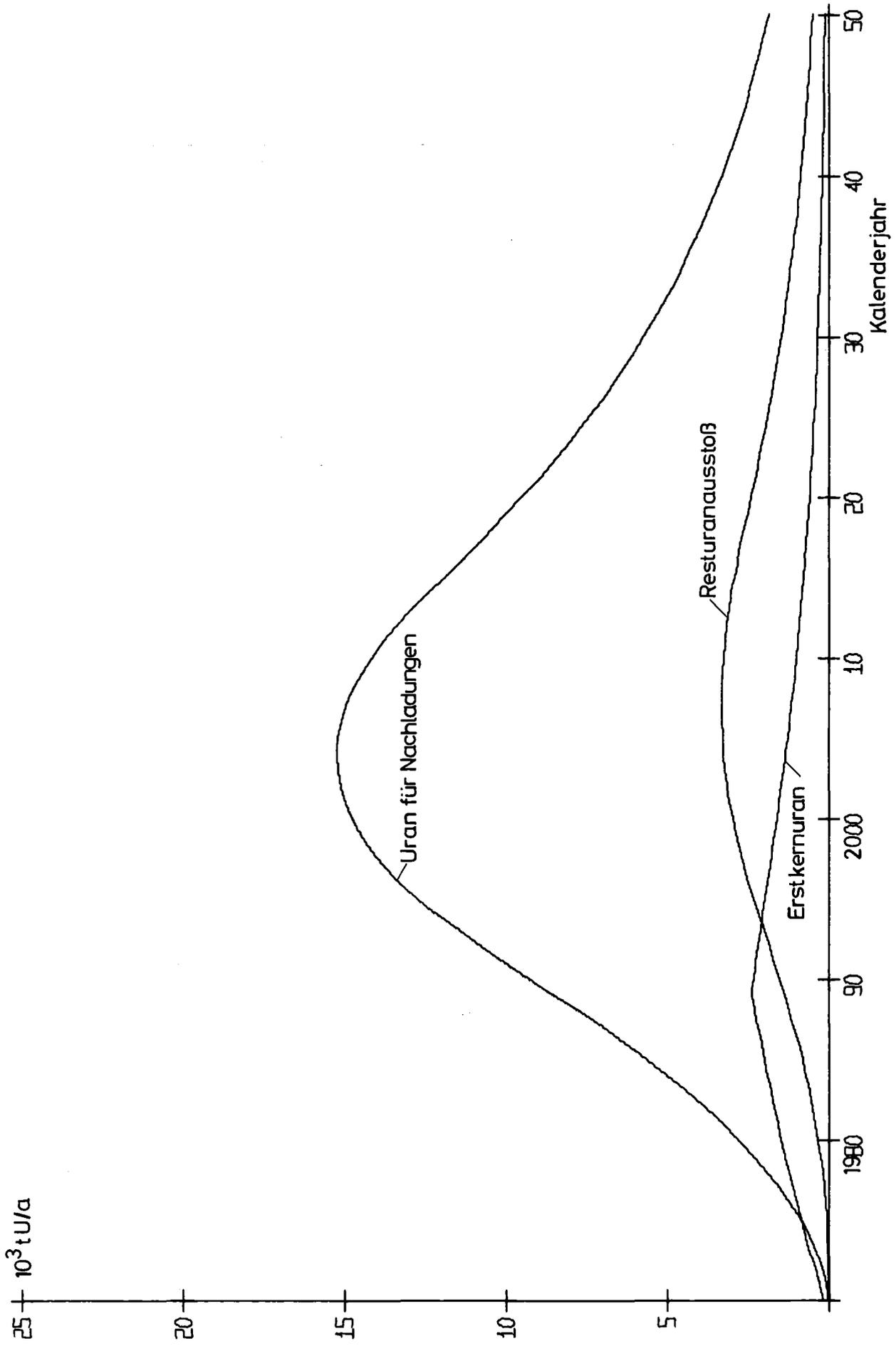


ABB. 3.5 URANBEDARF UND RESTURANAUSSTOSS FÜR LWR - MODELL A1

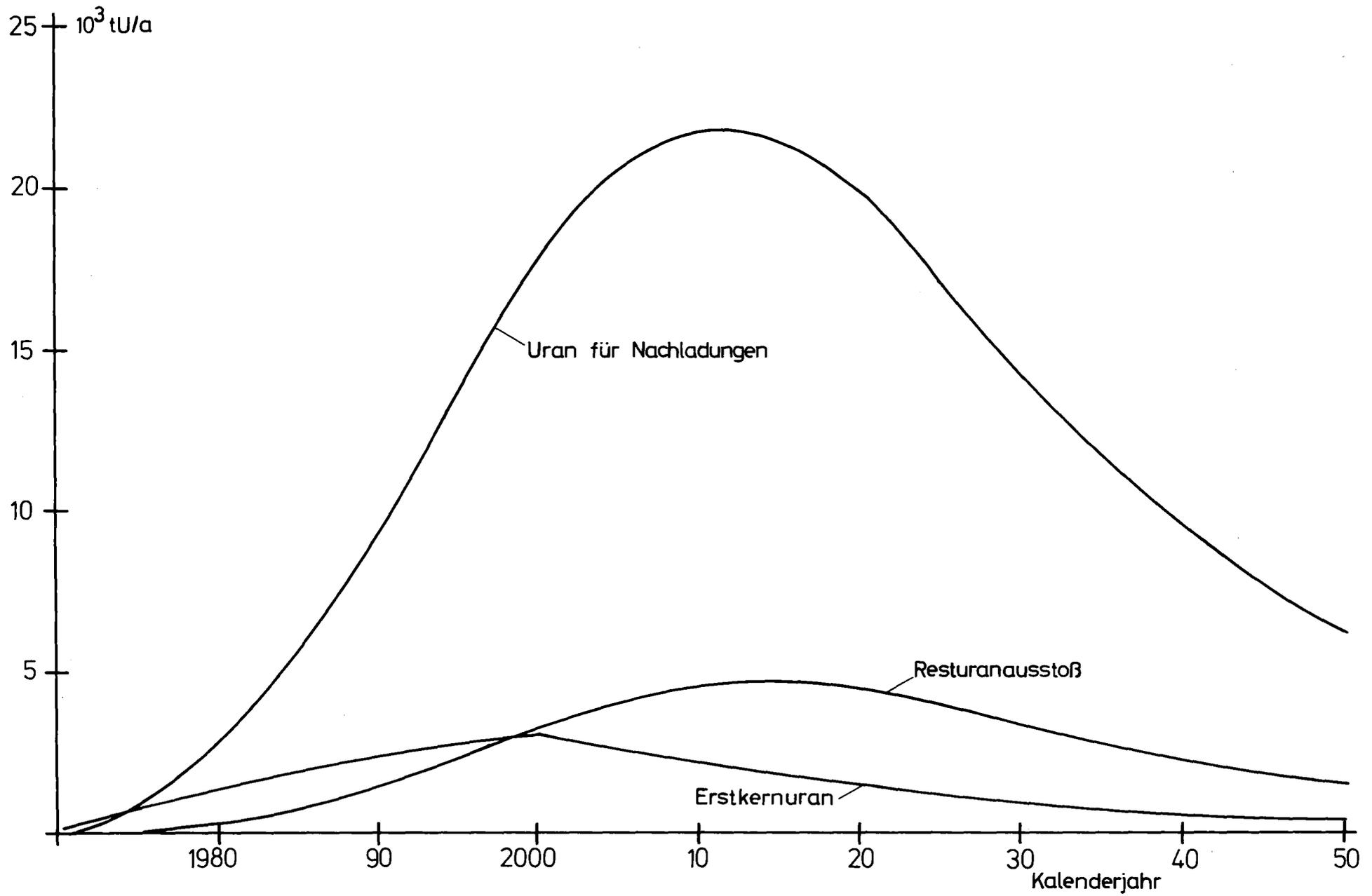


ABB. 3.6 URANBEDARF UND RESTURANAUSSTOSS FUER LWR-MODELL A2

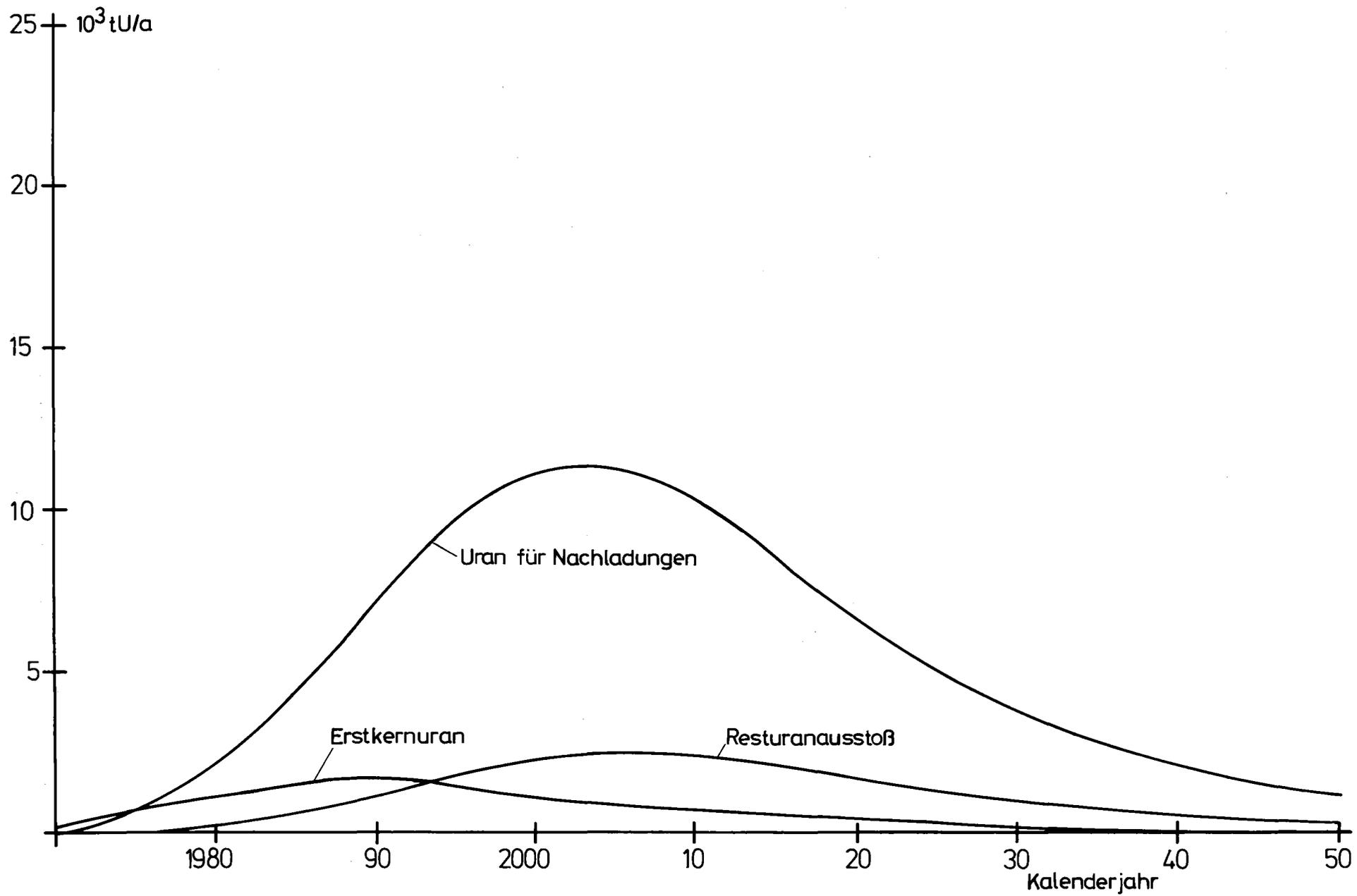


ABB. 3.7 URANBEDARF UND RESTURANAUSSTOSS FUER LWR-MODELL B1

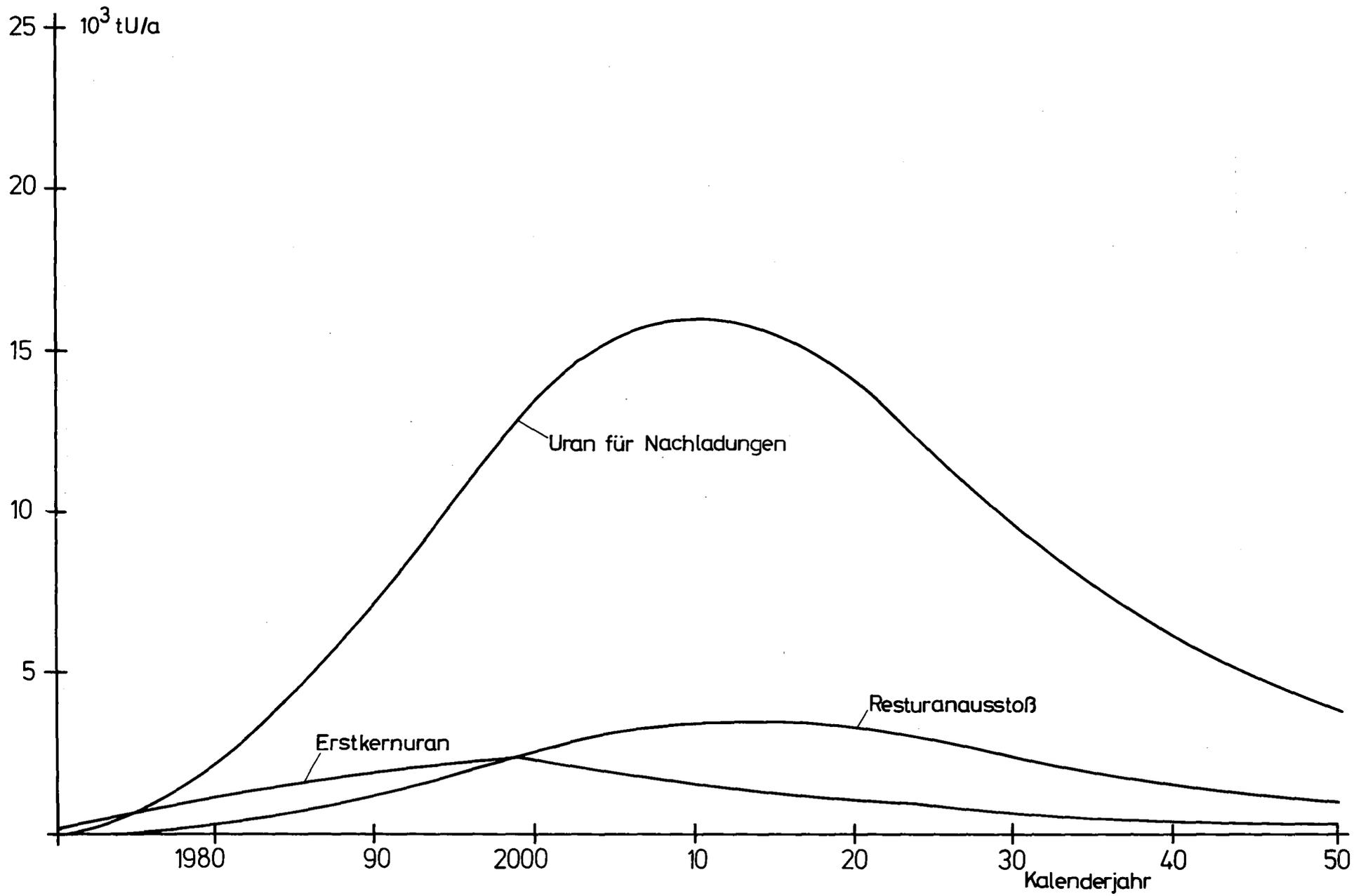


ABB. 38 URANBEDARF UND RESTURANAUSSTOSS FUER LWR-MODELL B2

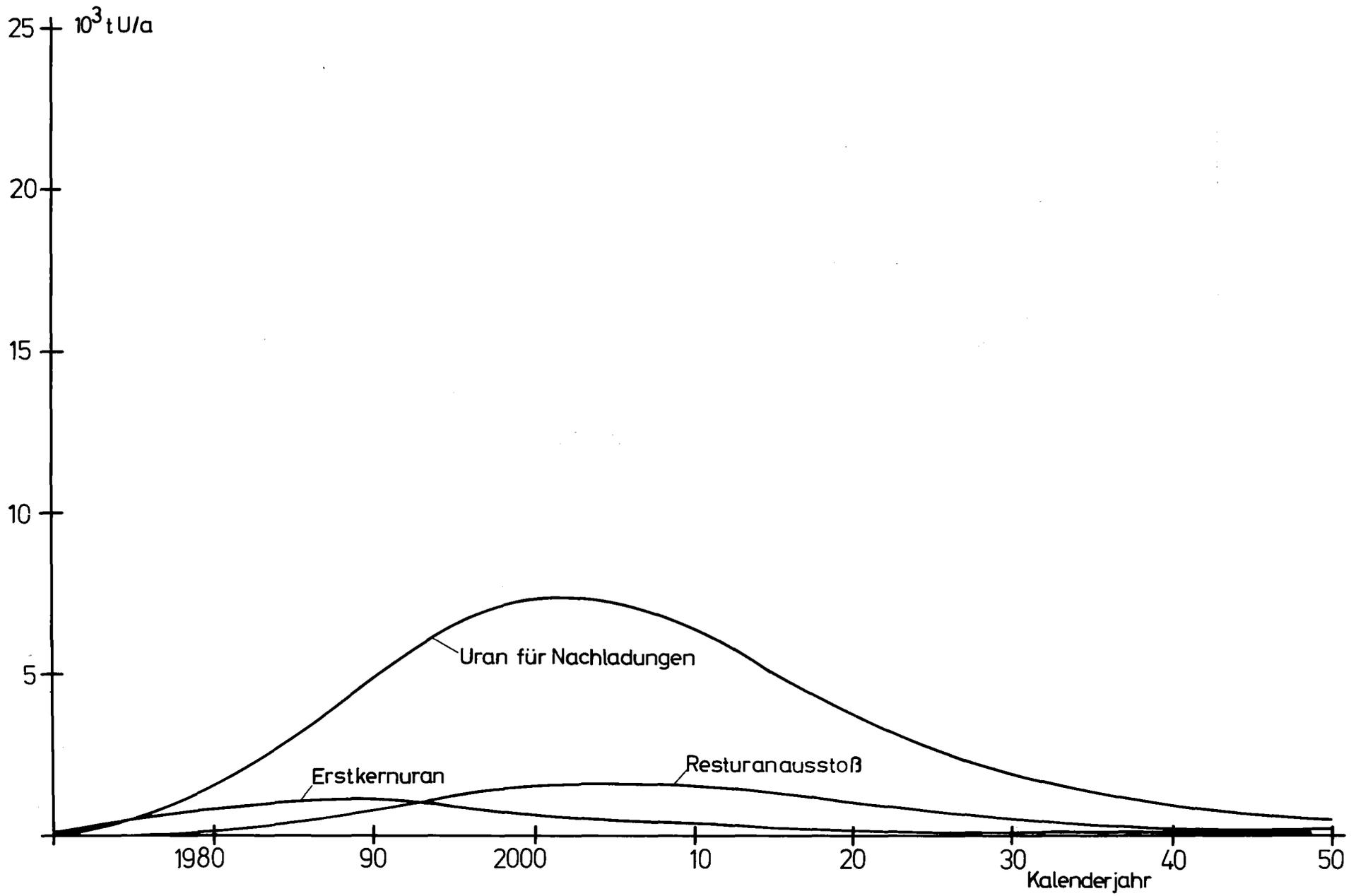


ABB. 3.9 URANBEDARF UND RESTURANAUSSTOSS FUER LWR- MODELL C1

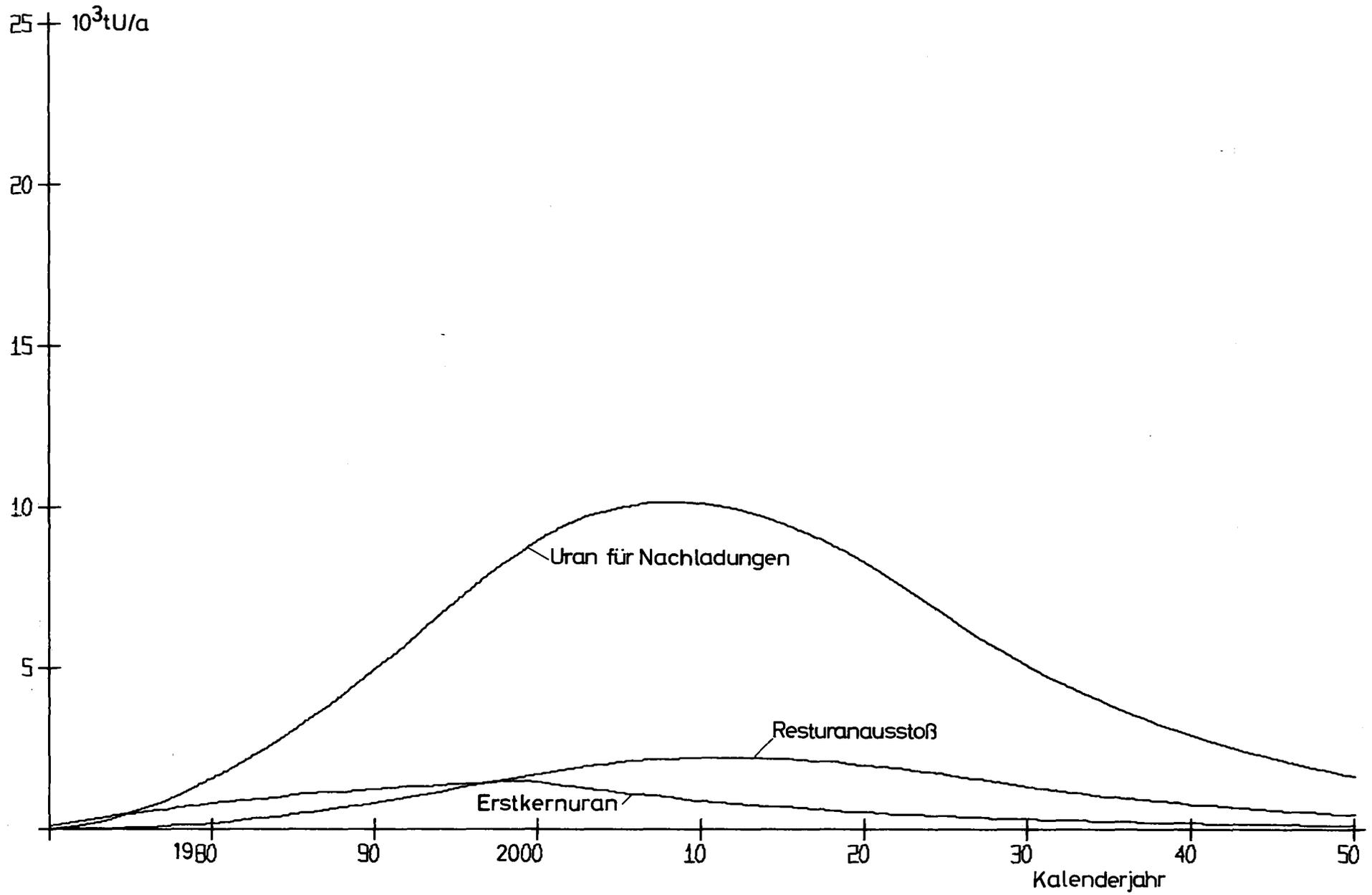


ABB. 3.10 URANBEDARF UND RESTURANAUSSTOSS FUER LWR - MODELL C2

Tabelle 3.3: Zeitlich summierter Uranbedarf der Bundesrepublik Deutschland bis 2100 bei Einführung von Oxidbrütern als uransparende Reaktoren in 10^3 t U

Einführungszeit	Modell A	Modell B	Modell C
1990	497	357	215
2000	879	612	355
2010	1273	874	493
nur Leichtwasserreaktoren bis 2100	4202	2783	1510

Eine weitere Zahlenangabe soll den Einfluß der Einführungsgeschwindigkeit uransparender Reaktoren verdeutlichen. Nach Tabelle 3.3 beträgt der kumulierte Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren für Modell B bei Einführungszeitpunkt 2010 dann 874 000 t U_{nat} , wenn die Einführungsgeschwindigkeit der uransparenden Reaktoren anfangs der der Leichtwasserreaktoren entspricht (wie bisher durchweg angenommen, vgl. Abschnitt 2.5). Bei Verdopplung dieser Einführungsgeschwindigkeit würde der kumulierte Uranbedarf für Leichtwasserreaktoren bei gleichem Einführungszeitpunkt auf 639 000 t U_{nat} absinken.

Der bis 2100 zusätzlich anfallende Uranbedarf für uransparende Reaktoren ist vom Typ dieser Reaktoren abhängig. Im Falle der Schnellen Brutreaktoren ist dieser Zusatzbedarf so gering, daß er gut durch das in den Anreicherungsanlagen anfallende abgereicherte Uran gedeckt werden kann. Allerdings dürfen von Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit abhängige Werte für das spezifische Pu-Zyklusinventar nicht überschritten werden, wenn die Schnellbrutreaktor-Einführung den Modellkurven entsprechend verlaufen soll. Bei Überschreitung würde das aus LWR und SBR zur Verfügung stehende Plutonium zumindest zeitweise nicht ausreichen, um die Zyklusinventare für das SBR-System aufbauen zu können.

Bei einem $Pu^{+})$ -Nettoausstoß der Schnellen Brutreaktoren von $100 \text{ kg/GW}_e \cdot \text{a}$ ergeben sich für Modell B die nachstehend aufgeführten spezifischen Zyklusinventare, die nicht überschritten werden dürfen:

+) Gemeint ist der spaltbare Pu-Anteil.

Einführungszeitpunkt	max. spez. Zyklusinventar in t Pu/GW _e
1990	3,6
2000	5,7
2010	7,7

Diese Anforderungen sind nur schwach vom Pu-Nettoausstoß der Schnellen Brutreaktoren abhängig.

Eine Erhöhung auf 150 kg Pu/GW_e·a, also um 50 %, würde nur um etwa 10 % höhere Zyklusinventare zulassen. Der Grund für diese geringe Abhängigkeit liegt darin, daß bei den hier betrachteten Zeitverläufen (vgl. Abbildungen 2.3 bis 2.5) für die Einführung uransparender Reaktoren die Leichtwasserreaktoren die Hauptlast für die Bereitstellung von Plutonium für Schnellbrutreaktoren-Zyklusinventare tragen müssen, wenn es sich um Oxidbrüter mit Brutraten um 1,15 handelt.

Im Falle von Karbidbrütern (Brutraten um 1,3 und Netto-Plutoniumproduktion um 300 kg Pu/GW_e·a) würde die Eigenproduktion der Brüter für den Aufbau weiterer Zyklusinventare stärker ins Gewicht fallen. Außerdem sind bei Karbidbrütern aus physikalischen Gründen geringere Zyklusinventare erreichbar als bei Oxidbrütern. Dieser Unterschied wäre bei der Einführung im Jahre 2000 aber weniger bedeutungsvoll als bei einer wenig realistischen Einführung um 1990, da auch für Oxidbrüter Zyklusinventare unter 6 t Pu/GW_e als technisch machbar erscheinen. Bei realistischen kommerziellen Einführungszeitpunkten und bei der betrachteten Einführungsgeschwindigkeit dürften also die erbrüteten Plutoniummengen zum Aufbau der Schnellbrutreaktoren-Inventare ausreichen.

Spätestens nachdem der Aufbau der Schnellbrüter-Inventare um 2050 weitgehend vollzogen ist, würde bei Beibehaltung der Brutrate überschüssiges Plutonium entstehen. Ein Teil davon könnte in dann noch installierte Leichtwasserreaktoren zurückgeführt werden, um Uran zu sparen. Entspre-

chende Urangutschriften sind nicht verrechnet worden. Dem entspricht die Annahme, daß die Brutrate dann so weit abgesenkt wird - die Stromerzeugungskosten würden geringer -, daß kein Plutoniumüberschuß entsteht. Gleichbedeutend wäre die Annahme, daß das Überschußplutonium in das Ausland verkauft wird. Ein Zahlenbeispiel soll die Größenordnung einer solchen möglichen Gutschrift verdeutlichen. Bei Schnellbrüter-Einführung im Jahre 2000, Brutrate 1,15, spezifisches Zyklusinventar für Schnellbrüter 5,7 t Pu/GW_e, entsteht bis 2100 ein Plutoniumüberschuß von 1000 t, der bei Rückführung in Leichtwasserreaktoren etwa 140 000 t U_{nat} sparen würde. Diese Gutschrift wäre nach Tabelle 3.3 mit einem zeitlich summierten Uranbedarf von 612 000 t U_{nat} zu vergleichen.

Als uransparendes Reaktorsystem kommt auch das aus "Vorbrütern" und "Nahebrütern" bestehende System von Hochtemperaturreaktoren in Betracht. Dieses System ist in Abschnitt 4.6 etwas näher erläutert.

In der Zeitabfolge würden mit der Einführung dieses Systems erst Vorbrüter zur Erzeugung des U-233 zum Aufbau der Zyklusinventare für Nahebrüter erstellt werden. Der jährliche Natururanbedarf von Vorbrütern ist bei gleicher Leistung ähnlich hoch wie der von Leichtwasserreaktoren. Nach den Daten von Anhang 3 würde ein Vorbrüter (Lastfaktor 0,7) 12 Jahre brauchen, um das Zyklusinventar für einen Nahebrüter bereitzustellen. Deshalb fällt während der Aufbauphase des Systems ein erheblicher Uranbedarf an.

Wenn das System bis 2100 voll aufgebaut sein soll, ergibt sich beispielsweise für Modell B kumuliert ein Natururanbedarf von 330 000 t für die Erstellung des System-Zyklusinventars. Hinzu kommt der Nachladebedarf für dieses System, der für das in Abbildung 2.5 dargestellte Beispiel B2 (Einführungszeitpunkt 2000) 260 000 t Natururan, kumuliert bis 2100, erfordert.

Das zuvor in Leichtwasserreaktoren erzeugte Plutonium steht in diesem Fall zur Rückführung in Leichtwasserreaktoren zur Verfügung. Dadurch können

insgesamt 120 000 t Natururan gespart werden. Der in Tabelle 3.3 für den Fall B2 angegebene kumulierte Uranbedarf von 612 000 t würde sich dadurch auf etwa 490 000 t reduzieren.

Insgesamt ergibt sich für die Summe aus Leichtwasserreaktor- und Hochtemperaturreaktor-Systemen bis 2100 ein kumulierter Natururanbedarf von etwa 1,08 Mio t, der mit 612 000 t für den Schnellbrutreaktor-Fall verglichen werden kann. Die 1,08 Mio t Natururan sind außerdem zu vergleichen mit der in Tabelle 3.3 angegebenen Zahl von 2,78 Mio t für Modell B, die sich ergibt, wenn bis 2100 nur Leichtwasserreaktoren gebaut werden.

3.5 Uranvorräte

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es gegenwärtig 2 Lagerstätten mit Uranvorräten, die als gesichert nachgewiesen gelten und bei heutigen Kosten wirtschaftlich gewinnbar sind (bis 80 g/kgU^+). Diese Lagerstätten enthalten auch "zusätzlich geschätzte Vorräte", die durch weitere Exploration ganz oder teilweise in "Reserven" überführt werden können. Für die Lagerstätten werden folgende Angaben gemacht /BGR (1978)/:

	Reserven in t U	zusätzl. geschätzte Vorräte in t U
Menzenschwand	850	2000
Müllenbach	1700	2300

Darüber hinaus werden für die Bundesrepublik bei den sicheren und zusätzlich geschätzten Vorräten je etwa 500 t U in der Kostenklasse 80 bis 130 g/kgU^{++}) genannt.

+) 78 $\text{g/kgU} \cong 30 \text{ g/lb } \text{U}_3\text{O}_8$

++) 130 $\text{g/kgU} \cong 50 \text{ g/lb } \text{U}_3\text{O}_8$

Nach Aussage von /ERZMETALL (1977)/ soll im Gebiet von Belchen und Feldberg (Schwarzwald) ein Uranpotential in der Größenordnung von 10-15 000 t vorhanden sein. Diese Ressourcen sind gegenwärtig lediglich als "prognostische Vorräte" zu bezeichnen.

Tabelle 3.4 zeigt einen zusammenfassenden Überblick über die Vorratssituation der Bundesrepublik für Gewinnungskosten bis zu 80 \$/kg U:

Tabelle 3.4: Uranvorräte Bundesrepublik (gewinnbar bis 80 \$/kgU)

Vorratsklasse	sicher	zusätzl. geschätzt	prognostisch
Vorräte in t U	2 550	4 300	10-15 000

Über Uranvorräte in Vorkommen mit geringer Konzentration sind nur wenige Daten verfügbar. Ohne Mengenangaben werden genannt:

- Permischer Kupferschiefer (40 ppm U)⁺)
- jurassischer Posidonienschiefer (20 ppm U)⁺)
- Uran in Rotschlamm (27 ppm U)⁺⁺)

Die Uransuche in der Bundesrepublik wird neuerdings auch von der Europäischen Kommission finanziell unterstützt /ERZMETALL (1977)/. Die geförderten Prospektionsgebiete liegen im Bayerischen Wald, in Mittelfranken, Niedersachsen und der Oberpfalz.

Bis heute sind etwa 25 % der Landfläche der Bundesrepublik mit Prospektionskonzessionen belegt, das sind praktisch alle höffigen Gebiete. Es ist durchaus möglich, daß mit verbesserter Prospektionstechnologie weitere Uranlagerstätten in der Bundesrepublik identifiziert werden können /BGR (1978)/.

⁺) Vgl. /VENZLAFF, H. (1976)/

⁺⁺) Vgl. /ERDTMANN, G. (1976)/

Die Urangewinnung in der Bundesrepublik betrug im Durchschnitt der letzten 3 Jahre weniger als 50 t U pro Jahr.

3.6 Vergleich des Uranbedarfs mit den Uranvorräten

Ein Vergleich der Bedarfsangaben in Tab. 3.3 mit der in Tab. 3.4 zusammengefaßten Vorratssituation zeigt, daß die gegenwärtig bekannten und zusätzlich vermuteten Uranvorräte der Bundesrepublik weniger als 2 % zur Deckung beitragen können (bei Einführung uransparender Reaktoren im Jahre 2000 oder später). Ein einziger Leichtwasserreaktor gegenwärtiger Bauart (1,3 GW_e) braucht in 30 Jahren rund 5 000 t Natururan, d.h. mehr als die gesicherten Reserven der Bundesrepublik Deutschland.

Die nach Tab. 3.4 mit rund 20 000 t U zu veranschlagende Summe aus einigermaßen gesicherten, zusätzlich vermuteten und "prognostischen" Vorräten wirtschaftlich gewinnbarer Uranvorkommen würde nur ausreichen, um 4 Leichtwasserreaktoren gegenwärtigen Bautyps zu versorgen.

Solange nicht uransparende Reaktortypen vorherrschen, und d.h. nach Abschnitt 3.4 etwa für die nächsten 50 Jahre, wird die Bundesrepublik ganz überwiegend auf Uranimporte angewiesen sein.

Auch die übrigen westeuropäischen Länder (vielleicht mit Ausnahme Frankreichs) werden vermutlich in starkem Maße von Uranimporten abhängen (vgl. Abschnitt 5.5).

Man muß daher Abschätzungen über die Entwicklung des weltweiten Uranbedarfs mit Angaben über die Versorgungsbasis vergleichen, um zu einer Charakterisierung möglicher Versorgungsprobleme für die Bundesrepublik zu gelangen. Aussagen dazu werden in den nachfolgenden Kapiteln gemacht. Zunächst folgt eine umrißartige Darstellung der künftigen weltweiten Bedarfsentwicklung für Uran.

4. Abschätzungen zur Entwicklung des weltweiten Uranbedarfs

4.1 Der Umfang der künftigen Kernenergienutzung

Die von internationalen Organisationen veröffentlichten Schätzungen für den weltweiten Einsatz der Kernenergie bis 2000 haben sich in den letzten Jahren deutlich zu geringeren Zahlen hin bewegt. Tabelle 4.1 zeigt neuere Angaben dazu für 1985 und 2000.

Tabelle 4.1: Neuere Angaben zur Entwicklung internationaler Kernenergiekapazität in GW_e

	OECD-Länder		Welt	
	1985	2000	1985	2000
OECD (1977)	259-343	850-1640		
MIIDA, J., et al. (1977)	293-389	829-1640		
LANE, J.A., et al.(1977)			305-460	1403-2227
WAES 1977	267-365	765-1347		
World Energy Conf. 1977	247	955	303	1543

Die Angaben für 1985 können sich inzwischen weitgehend auf konkrete Reaktorprojekte stützen, die bereits im Baustadium sind. Die großen Zahlenspannen, die Tabelle 4.1 für 2000 aufweist, kennzeichnen die Prognose-schwierigkeiten, die unter anderem mit der nur schwer einschätzbaren Entwicklung der Akzeptanz der Kernenergie auf nationaler und internationaler Ebene zusammenhängen. Es ist nicht auszuschließen, daß die installierte Kernenergiekapazität im Jahre 2000 eher bei 1000 GW_e als bei 1500 GW_e liegen wird. Angaben über den Kernenergieeinsatz im nächsten Jahrhundert können eigentlich nicht mehr leisten, als mehr oder weniger einleuchtende Modellvorstellungen zu umreißen, die dann neben anderen Modellvorstellungen auf ihre Implikationen zu untersuchen sind.

In Abbildung 4.1 ist ein Modell für den Umfang des Kernenergieeinsatzes (gemessen in entsprechenden Primärenergieeinheiten, d.h. an der Wärmeenergie, die im Reaktorkern frei wird) zusammen mit einer Bandbreite erwartbarer Primärenergienachfrage dargestellt⁺⁾ .

Für 2000 entspricht das Modell einer weltweit installierten Kernenergiekapazität von 1500 GW_e, in Übereinstimmung mit den Schätzungen der Weltenergiekonferenz (WEC) 1977 (vgl. Tabelle 4.1).

Die Extrapolation für den weiteren, langfristigen Einsatz wurde so vorgenommen, daß die Kernenergie einen zwar nicht vorherrschenden, aber dennoch wichtigen Anteil an der Energieversorgung übernimmt. Bei dieser Modellentwicklung wären um 2050 je nach Höhe des Energiebedarfs zwischen 20 % und 40 % der erwartbaren Primärenergienachfrage durch Kernenergie abgedeckt.

Auf der WEC 1977 wurden 5033 GW_e für 2020 genannt, die bei dem vorliegenden Modell erst um 2050 erreicht werden. Es wird also eine Modellentwicklung untersucht, die Anfang des nächsten Jahrhunderts nicht an die Grenzen eines optimistisch eingeschätzten Ausbaupotentials heranreicht. Dabei müßten Kohle und regenerative Energieträger im nächsten Jahrhundert in zunehmendem Maße Erdöl und Erdgas substituieren und darüber hinaus einen Teil des Wachstums der Primärenergienachfrage übernehmen.

Die Annahmen, die das in Abbildung 4.1 dargestellte Band der Primärenergienachfrage maßgebend bestimmen, sind:

- Die Weltbevölkerung wird sich deutlich erhöhen: Von gegenwärtig etwas über 4 Mrd Menschen auf etwa 6 Mrd Menschen im Jahre 2000. Im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts wird die Bevölkerung auf 8 bis 15 Mrd Menschen ansteigen.

⁺⁾ Die in den Spaltreaktoren freigesetzte Wärmeenergie wird in diesem Jahrhundert ganz überwiegend zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Im nächsten Jahrhundert kommt darüber hinaus in zunehmendem Maße ein Einsatz für Fernwärme, chemische Sekundärenergieträger und Prozeßwärme in Betracht.

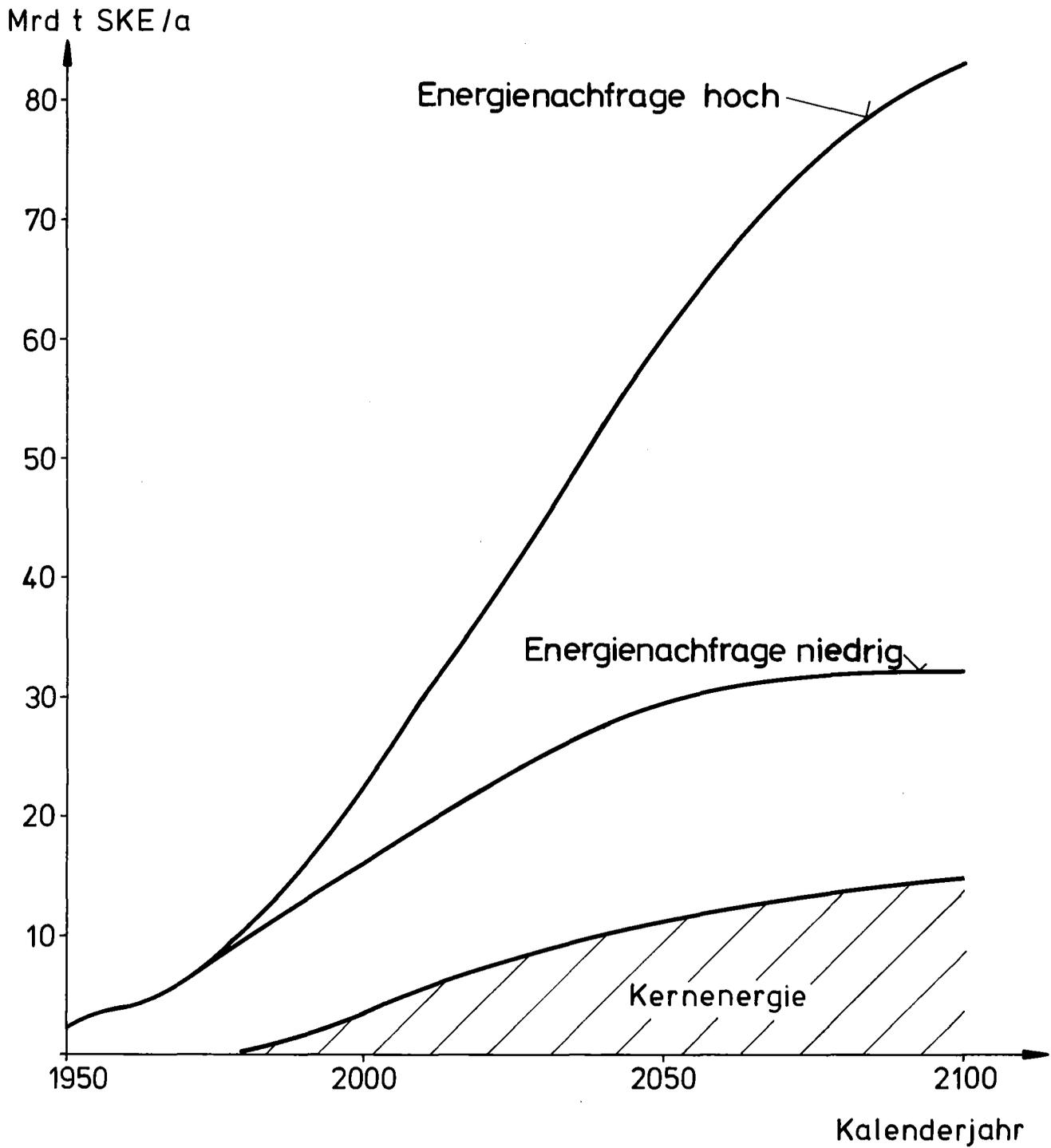


Abb. 4.1 Kernenergieeinsatz weltweit (Modell) und Primärenergienachfrage

- Unter dem Druck der Versorgungsprobleme für alle Arten des Primärenergieeinsatzes und bei technologie-gestützter Verbesserung des Verhältnisses zwischen Nutzenenergieeinsatz und Primärenergieeinsatz wird der durchschnittliche Pro-Kopf-Einsatz an Primärenergie auch im Verlaufe einiger Generationen den gegenwärtigen USA-Einsatz pro Kopf nicht erreichen, mag aber etwas über dem gegenwärtigen Wert für die Bundesrepublik liegen (obere Grenze des Bedarfsbandes in Abbildung 4.1).
- Die untere Grenze des dargestellten Bedarfsbandes entspricht der Annahme, daß es trotz erfolgreicher Stabilisierung der Weltbevölkerung auf etwa 8 Mrd Menschen für "katastrophenfreie" Entwicklungen erforderlich sein wird, den durchschnittlichen Pro-Kopf-Einsatz von Primärenergie um einen Faktor 2 oder mehr zu heben.
- Die Bandbreite für das Jahr 2000 bedeutet gegenüber 1975 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.

4.2 Die Rolle uransparender Reaktortypen

In diesem Jahrhundert werden vorherrschend Leichtwasserreaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren) im Einsatz sein, deren Uranbedarf je GW_e installierter Kapazität zwischen rund 100 t/a Natururan (bei Rezyklierung von Uran und Plutonium) und 150 t/a (ohne Rezyklierung) liegt. In geringem Umfang werden gegenwärtig Schwerwasserreaktoren und gasgekühlte, graphitmoderierte Reaktoren eingesetzt, die im Falle der Rückführung des erbrüteten Plutoniums etwas, aber nicht entscheidend geringere Anforderungen an die Uranversorgung stellen. Wenn im folgenden vereinfachend

vom Typ "LWR" gesprochen wird, sind damit die Reaktortypen gegenwärtiger Generation gemeint, deren Bedarfs-Charakteristik durch jährlich (100-150)t U/GW_e gegeben ist, wobei ein (allerdings weniger wichtiger) Zuschlag für die Erstkerne neu errichteter Reaktoren hinzukommt.

Eine Verwirklichung des in Abbildung 4.1 dargestellten Kernenergieeinsatzes mit LWR erscheint unrealistisch. Ein Kernenergieeinsatz von 11 Mrd t SKE/a um 2050 entspricht einer installierten Kapazität von 500 GW_e. Für Reaktortypen mit LWR-Charakteristik würde das einen jährlichen Uranbedarf von 0,5 Mio t Natururan oder mehr bedingen, der von der Reservensituation her als unakzeptabel hoch erscheint (vgl. Kapitel 5).

Reaktortypen mit deutlich geringerem jährlichem Uranbedarf müssen eingesetzt werden, wenn die Kernenergie im nächsten Jahrhundert einen bedeutenden Beitrag zur Primärenergieversorgung leisten soll.

In Betracht kommen hier Schnelle Brutreaktoren, thermische Hochkonverter^{+) und gekoppelte Systeme von Brutreaktoren und thermischen Konvertern. Wenn solche Systeme einmal aufgebaut sind, können sie mit deutlich geringeren jährlichen Uranmengen je GW_e installierte Kapazität auskommen.}

Thermische Hochkonverter haben das Potential, mit Konversionsraten um 1,0 oder wenig darunter den spezifischen Uranbedarf um einen Faktor im Bereich von 5 bis 10 gegenüber dem von LWR zu verringern. Bei Brutreaktoren (Brutraten 1,1 bis 1,3) liegt dieser Faktor in der Gegend von 50. Beide Systeme brauchen jedoch während ihrer Aufbauphase entweder direkt (Uran zum Start von thermischen Hochkonvertern) oder indirekt (Plutonium aus LWR zum Start von Brutreaktoren) erhebliche Uranmengen für ihren Aufbau. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß auch für Thorium-Hochtemperatur-Reaktoren das Ressourcenproblem in erster Linie ein Pro-

^{+) HTR, LWBR (Leichtwasserbrutreaktor) /BATTELLE, COLUMBUS (1976)/ mit U 233/Th-Zyklus}

blem der Uranversorgung und nicht der Thoriumversorgung ist. Ein HTR mit einer Konversionsrate von 0,9 braucht beispielsweise deutlich mehr Uran als Thorium. Entscheidend ist jedoch: Wenn es in ferner Zukunft gelingt, den Ressourcenbedarf durch Hochkonverter oder Brüter auf Ansprüche an die Versorgung mit Brutstoff (U-238 oder Th-232) zu reduzieren, wird eine solche Versorgung kein Problem mehr sein, da die Ansprüche dann vergleichsweise gering sind. In der entscheidenden Übergangsphase handelt es sich um ein Problem der Spaltstoffversorgung, für die die natürliche Basis auf den Gehalt von 0,71 % U-235 im Natururan begrenzt ist und sich nicht auf natürliche Th-Isotope erstreckt. Deshalb wird nicht weiter auf die Fragen der Thorium-Versorgung eingegangen. Die natürlichen abbauwürdigen Th-Vorkommen sind vergleichbar mit den Uranvorkommen oder größer.

Im folgenden wird auf eine Reihe von Umständen hingewiesen, die einem raschen weltweiten Übergang zu uransparenden Reaktortypen entgegenstehen. Sie werden dann anhand der in Abbildung 4.1 dargestellten Modellentwicklung beispielhaft quantitativ beschrieben. Das dabei zunächst verfolgte Ziel ist eine Begründung der Aussage, daß in den nächsten rund 40 Jahren nicht mit einer entscheidenden Entlastung des weltweiten Uranbedarfs durch uransparende Reaktortypen zu rechnen ist. Eine Diskussion der Implikationen für Probleme der Uranversorgung schließt sich daran an.

4.3 Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit uransparender Reaktoren

Thermische Hochkonverter (Konversionsrate $> 0,95$) und Schnelle Brutreaktoren können nur bei großtechnisch funktionsfähiger Wiederaufarbeitung und Refabrikation von Brennelementen mit erbrütetem Brennstoff uransparende Reaktoren sein. Entsprechend ist die wirtschaftliche Attraktivität bei Uranverknappung und hohen Uranpreisen an die Schließung des Brennstoffkreislaufs gebunden. Technische Entwicklungsarbeiten und groß-

technische Demonstrationen erfordern dazu noch eher 20 Jahre als 10 Jahre. Es können Zeitverzögerungen durch nationale und internationale Akzeptanzbedingungen hinzukommen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß die in Entwicklung befindlichen uransparenden Reaktortypen mit ihren Brennstoffzyklen höhere Anforderungen an Absicherungsmaßnahmen gegen Mißbrauch, wie Proliferation, stellen als die gegenwärtigen LWR.

Wenn einmal die technischen, wirtschaftlichen und politischen Voraussetzungen für den Übergang zu den uransparenden Reaktortypen in einigen Ländern oder Ländergruppen vorliegen, wird man nicht schlagartig auf der ganzen Welt von der Bestellung von LWR zur Bestellung der neuen Reaktortypen übergehen. Die erforderlichen Voraussetzungen werden wohl für die hoch-industrialisierten Länder eher gegeben sein als für weniger industrialisierte Länder. Länder mit reichen Uranvorkommen dürften einen solchen Übergang weniger eilig vollziehen als uranarme Länder. Es ist auch nicht zu erwarten, daß innerhalb größerer Länder alle Energieversorgungsunternehmen ihre Auftragsentscheidungen gleichzeitig umorientieren. Schließlich wird die Zulieferindustrie ihre Kapazität nicht von einem Jahr zum anderen voll umstellen können.

Für einige denkbare Einführungsgeschwindigkeiten werden nachfolgend ihre Auswirkungen auf den Uranbedarf für LWR modellhaft beschrieben. Dabei wird die Einführungsgeschwindigkeit durch eine Zeitkonstante (τ) charakterisiert, mit der der Anteil von LWR an der jährlichen Erstellungsrate aller Reaktortypen nach dem Einführungszeitpunkt zeitlich exponentiell abfällt (vgl. Abbildung 4.2). Der wachsende Restanteil entfällt dabei auf die uransparenden Reaktortypen.

Zur Erläuterung der in Abbildung 4.2 dargestellten Fälle a, b, c:

- Fall a stellt den theoretischen Grenzfall dar, in dem ab Einführungszeitpunkt t_e nur noch uransparende Reaktoren erstellt werden.

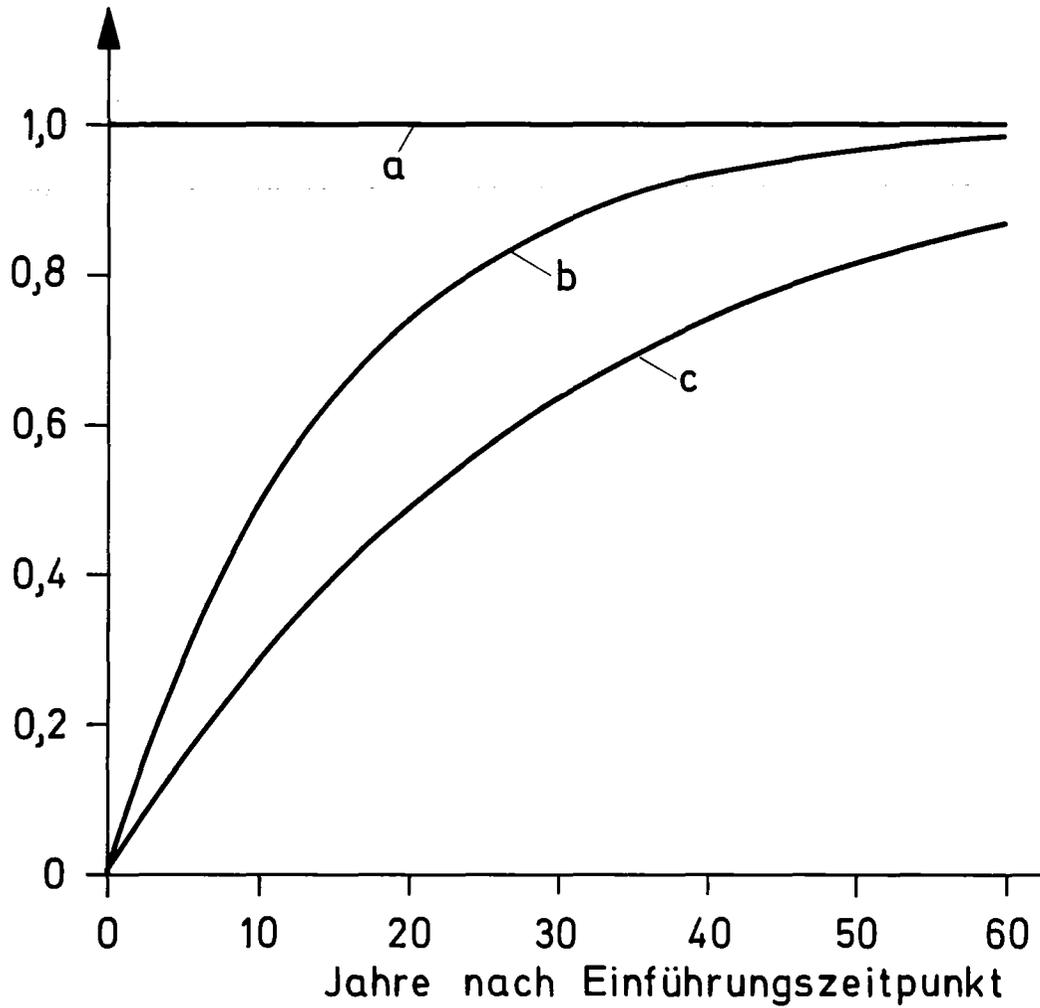


Abb.4.2 Anteil uransparender Reaktoren an der jährlichen Reaktorerstellung

Zeitkonstante (τ) für Einführungs-
geschwindigkeit

a : $\tau = 0$ Jahre

b : $\tau = 15$ Jahre

c : $\tau = 30$ Jahre

- Fall b ist durch eine Zeitkonstante von 15 Jahren gekennzeichnet. Dabei würde 10 Jahre nach Einführungszeitpunkt t_e die Hälfte aller jährlich neuerstellten Reaktoren auf uransparende Reaktortypen entfallen.
- Im Fall c beträgt die für die Einführungsgeschwindigkeit charakteristische Zeitkonstante 30 Jahre. Dabei wird es etwa 20 Jahre dauern, bis die Hälfte der jährlich neuerstellten Reaktoren auf uransparende Typen entfällt.

Abbildung 4.3 demonstriert für das beispielhaft ausgewählte Einführungsjahr 2000 für uransparende Reaktoren, welche Auswirkungen unterschiedliche Einführungsgeschwindigkeiten (a, b, c) auf den Verlauf der installierten LWR-Kapazität haben. Es wird dabei angenommen, daß bereits in Betrieb befindliche LWR bis zum Ende einer mittleren Lebensdauer von 30 Jahren in Betrieb bleiben.

Bei der hier untersuchten Modellentwicklung des Einsatzes der Kernenergie und bei Einführungszeitpunkten t_e für uransparende Reaktoren um 2000 oder 2010 bedeutet Fall c in absoluten Zahlen: 5 Jahre nach t_e sind 50 GW_e, 10 Jahre nach t_e 200 GW_e der uransparenden Reaktoren installiert. Dies entspricht etwa der Ausbaugeschwindigkeit der LWR von 1970 bis 1980 (vgl. Abbildung 4.3). Für Fall b sind die entsprechenden Zahlen rund doppelt so groß. Sieht man von dem unrealistischen theoretischen Grenzfall a in Abbildung 4.3 ab, so kann man aus der Abbildung erkennen, daß die Einführungsgeschwindigkeit der neuen Reaktortypen für die installierte LWR-Kapazität von großer Bedeutung ist.

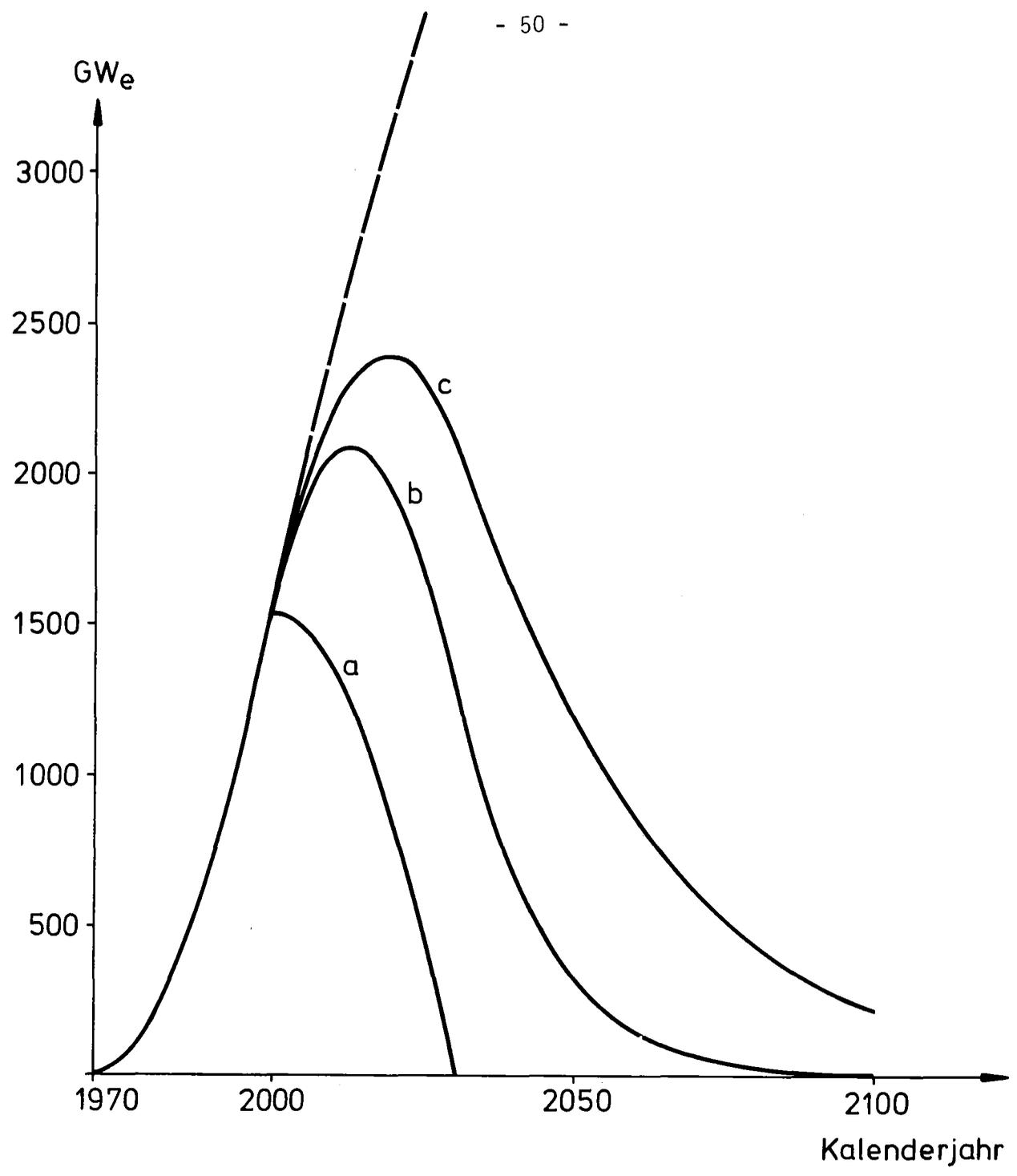


Abb. 4.3 Installierte LWR-Kapazität für verschiedene Einführungsgeschwindigkeiten bei $t_e = 2000$

- a: $\tau = 0$ Jahre
- b: $\tau = 15$ Jahre
- c: $\tau = 30$ Jahre
- — — Kernenergie gesamt

4.4 Die Auswirkung wichtiger Einflußgrößen auf den jährlichen und kumulierten Uranbedarf

In diesem Abschnitt wird dargestellt, welche Auswirkungen Variationen von Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit uransparender Reaktoren auf den jährlichen und zeitlich kumulierten Uranbedarf der Reaktoren vom LWR-Typ haben. Danach wird (im Abschnitt 4.5) auf unrealistische Bereiche dieser Varianten hingewiesen, um den erwartbaren Uranbedarf für die in Abbildung 4.1 dargestellte Modellentwicklung des weltweiten Kernenergieeinsatzes zur Abschätzung eines Mindestbedarfs näher einzugrenzen. Für den einigermaßen übersichtlichen Fall Schneller Brutreaktoren werden dann (in Abschnitt 4.6) Randbedingungen dargestellt, die sich aus dem Plutoniumbedarf für den Aufbau der Zyklusinventare ergeben.

Der künftige weltweite Uranbedarf wird in erster Linie der Uranbedarf gegenwärtiger Reaktortypen mit LWR-Charakteristik sein. Deshalb ist es nützlich, zunächst den Uranbedarf für diesen Reaktortyp zu diskutieren und erst danach auf weniger gravierende zusätzliche Anforderungen durch nachfolgende uransparende Reaktortypen einzugehen. Dieses Vorgehen hat außerdem den Vorteil, daß sich für die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Varianten des Einführungszeitpunktes und der Einführungsgeschwindigkeit jeweils ein spezifischer zeitlich summierter Gesamtbedarf für LWR angeben läßt.

Der jährliche Uranbedarf wird bei LWR deutlich stärker durch den Uranbedarf für Nachladungen als durch den für Erstkerne bestimmt. Daher ist der jährliche Uranbedarf in erster Näherung proportional zur installierten LWR-Kapazität. Der zeitliche Verlauf der installierten LWR-Kapazität wurde in Abbildung 4.3 bei festem Einführungszeitpunkt t_e für die Varianten (a, b und c) der Einführungsgeschwindigkeit dargestellt. Diese Abbildung vermittelt gleichzeitig einen ungefähren Eindruck über die Abhängigkeit des jährlichen Uranbedarfs von der Einführungsgeschwindigkeit.

Abbildung 4.4 verdeutlicht die Abhängigkeit des jährlichen Uranbedarfs für LWR vom Zeitpunkt der Einführung uransparender Reaktoren bei gegebener Einführungsgeschwindigkeit (hier für das Beispiel $\tau = 15a$). Der dargestellte Uranbedarf ist die Summe aus Nachladebedarf und Bedarf für Erstkerne der LWR während der Aufbauphase des LWR-Systems. Für den Uranbedarf bei der erforderlichen Anreicherung wurde (durchgehend in diesem Bericht) angenommen, daß die Anreicherungsanlagen das Natururan bis auf einen Restgehalt von 0,25 % an U-235 ausnutzen. Es wurde weiter unterstellt, daß das in LWR erbrütete Plutonium nicht rezykliert, sondern gegebenenfalls für die Zyklusinventare nachfolgender Brutreaktoren eingesetzt wird. Die gestrichelten Kurven in Abbildung 4.4 zeigen die mögliche Verringerung des Uranbedarfs durch Rückführung von U-235 aus entladenen LWR-Brennstoffen. Dazu wurde angenommen, daß die Rückführung in wachsendem Umfang ab 1990 einsetzt und ab 2010 in vollem Umfang durchgeführt wird. Vermutlich kleinere Anteile der Rückführung von Resturan bis 1990 sind vernachlässigt.

In Abschnitt 4.5 werden Gründe dafür genannt, daß Einführungszeiten vor etwa 2005 für uransparende Reaktoren unwahrscheinlich sind. Nach Abbildung 4.4 ist dann zu erwarten, daß der weltweite jährliche Uranbedarf für LWR bis 2010 ständig bis auf rund 0,3 Mio t U/a ansteigt, wenn der Umfang des Kernenergieeinsatzes etwa der hier zugrundegelegten Modellentwicklung entspricht. Das würde eine Steigerung des Bedarfs um etwa einen Faktor 10 innerhalb von 30 Jahren gegenüber gegenwärtigen Verhältnissen bedeuten.

Den ab 1970 bis zum jeweiligen Kalenderjahr zeitlich summierten Uranbedarf zeigt Abbildung 4.5 (ausgezogene Linien^{+) für die Fälle, für die in Abbildung 4.4 der jährliche Bedarf dargestellt wurde.}

Die Abbildung läßt erkennen, daß im Falle der durch $\tau = 15a$ charakterisierten Einführungsgeschwindigkeit bis 2050 selbst für $t_e = 2000$ 12 Mio t U weltweit für Reaktoren mit LWR-Charakteristik gebraucht würden. Eine zeitliche Verschiebung der Einführung uransparender Reaktoren um 10 Jahre

⁺) Auf die gestrichelten Kurven von Abbildung 4.5 wird später eingegangen.

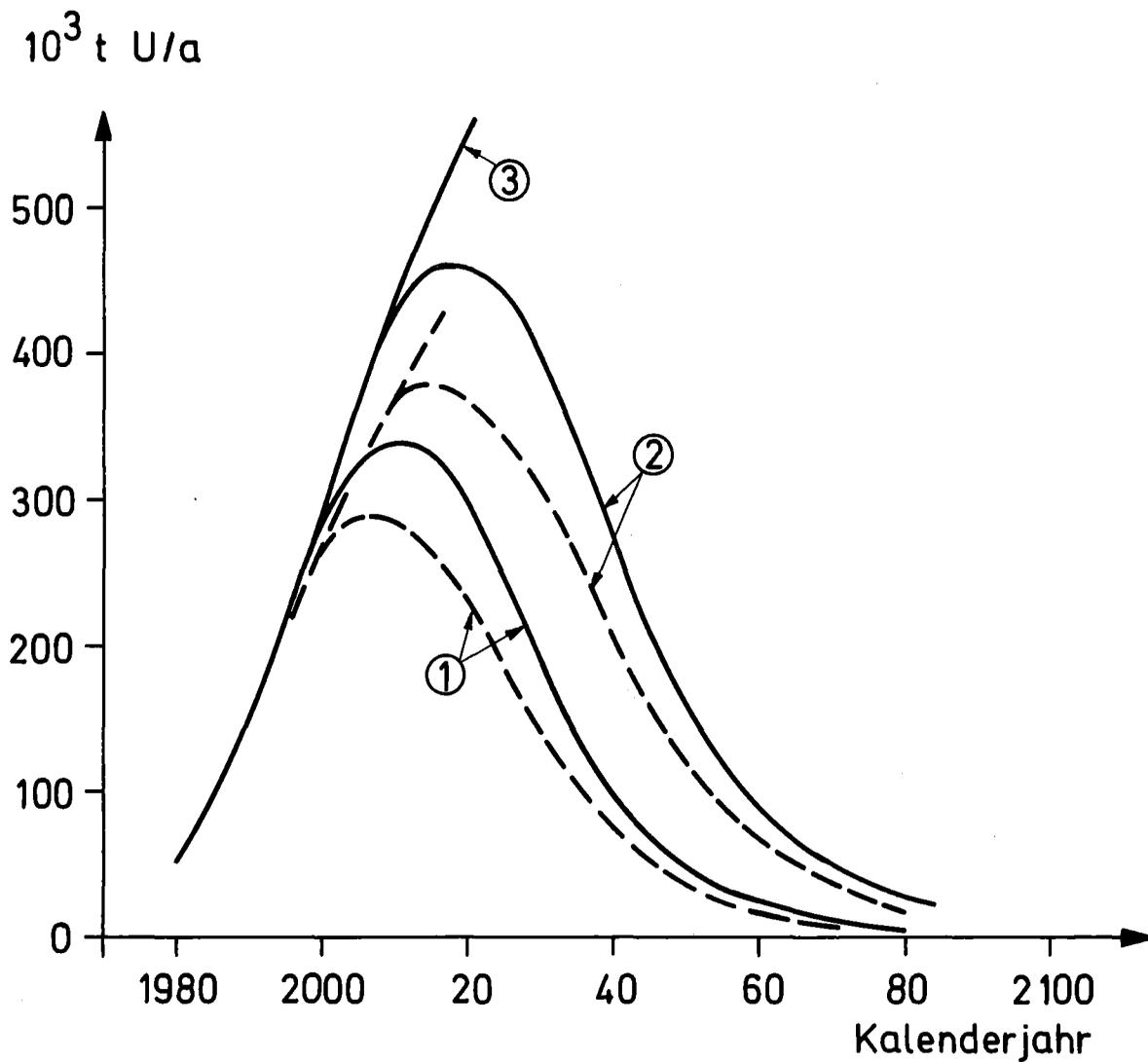


Abb. 4.4 Jährlicher Uranbedarf, weltweit, LWR

$\tau = 15a$

— ohne Rezyklierung von Resturan und Pu

--- bei Rezyklierung von Resturan ab 1990

Einführungszeitpunkte für uransparende Reaktoren:

$t_e = 2000$ ①

$t_e = 2010$ ②

weiter LWR ③

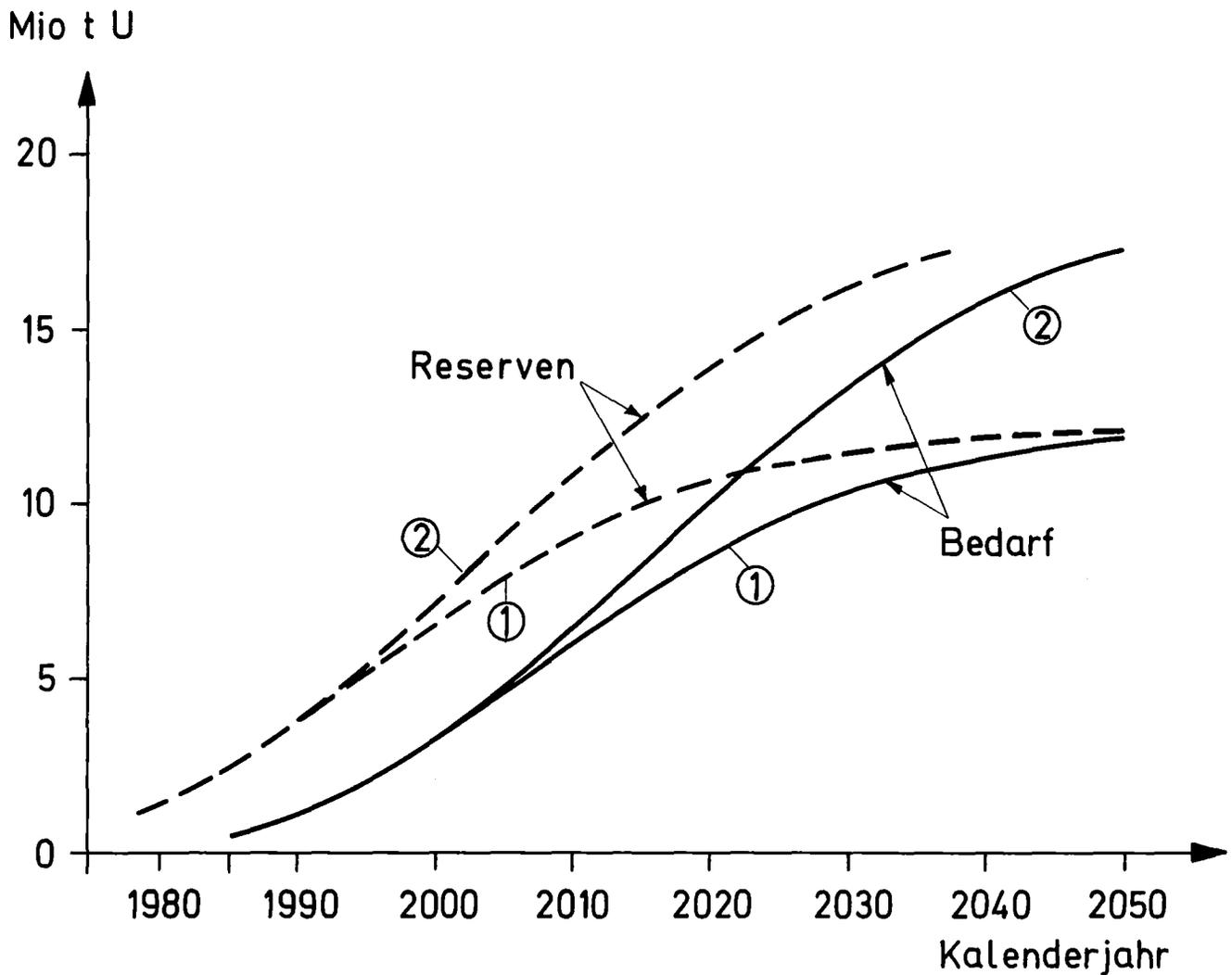


Abb.4.5 Kumulierter Uranbedarf und erforderliche kumulierte Reserven, weltweit, LWR

Rezyklierung von Resturan, ohne Pu - Rezyklierung
Einführungsgeschwindigkeit b ($\tau = 15$ a)
Einführungzeitpunkte für uransparende Reaktoren:
 $t_e = 2000$ ①
 $t_e = 2010$ ②

führt bei gleicher Einführungsgeschwindigkeit zu einer Erhöhung des Gesamtbedarfs für LWR bis 2050 um 45 %.

Abbildung 4.6 gibt Auskunft darüber, welche Kombinationen von Einführungszeit und Einführungsgeschwindigkeit für uransparende Reaktoren zu welchem Gesamtbedarf für LWR führen. Hier ist der Gesamtbedarf für LWR für verschiedene Einführungsgeschwindigkeiten als Funktion des Einführungsjahres für die uransparenden Reaktoren dargestellt. Zeitlich fällt der Uranbedarf dabei überwiegend bis 2050 an. Bei geringer Einführungsgeschwindigkeit und/oder später Einführungszeit (eher 2020 als 2000) fällt ein Restbedarf noch nach 2100 an. Die Abbildung verdeutlicht die starke Abhängigkeit des Gesamtbedarfs an Natururan sowohl vom Einführungszeitpunkt als auch von der Einführungsgeschwindigkeit. Dabei ist die Abhängigkeit vom Einführungszeitpunkt bei geringeren Einführungsgeschwindigkeiten stärker als bei höheren.

4.5 Randbedingungen durch Grenzen zeitlicher Machbarkeit

In Abbildung 4.7 ist links durch die bis 2005 reichende Schraffur die Einschätzung gekennzeichnet, daß eine großtechnische Einführung uransparender Reaktoren vor 2005 unrealistisch ist.

Zur Begründung dieser Einschätzung ist in erster Linie auf den Zeitaufwand zur Schaffung der erforderlichen Voraussetzungen zu verweisen. Bei Einführung im Jahre 2005 würden z.B. bei einer durch $\tau = 15a$ gekennzeichneten Einführungsgeschwindigkeit zwischen 2005 und 2010 etwa 100 GW_e installiert werden müssen. Die dazu erforderlichen Auftragsentscheidungen müßten wegen Bauzeit und Zeitbedarf für Genehmigungsverfahren zwischen 1995 und 2000 erfolgen.

Bei einem derart großen Auftragsvolumen für eine neue Technologie muß das Risiko für Fehlinvestitionen genügend gering sein. Das setzt eine vorangehende Demonstration der Funktionsfähigkeit bei ausreichend großem tech-

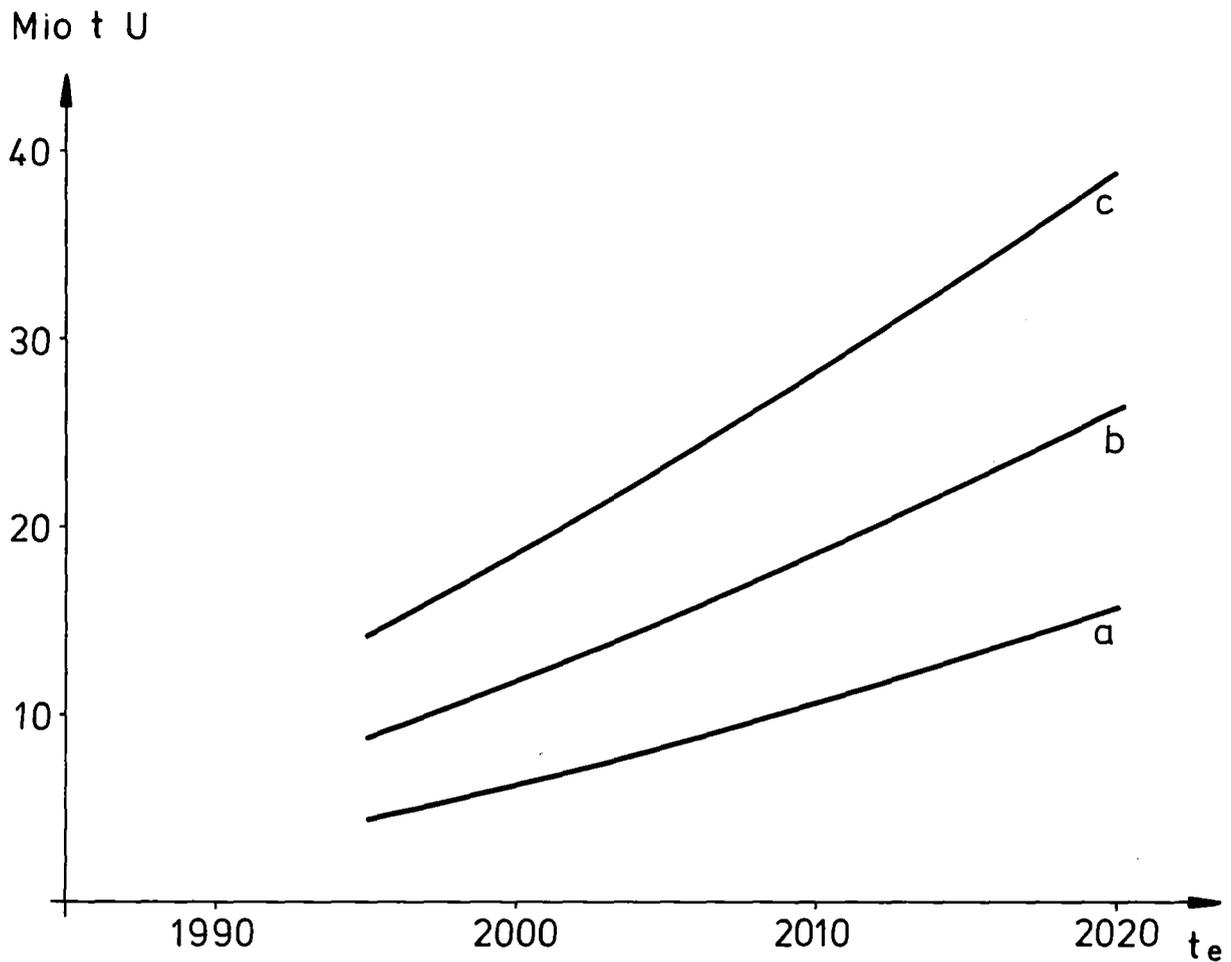


Abb. 4.6 Kumulierter Welt - Uranbedarf
(1970 - 2100) für LWR in Abhängigkeit
vom Einführungszeitpunkt t_e uran-
sparender Reaktoren

nischen Maßstab voraus, bei der die wirtschaftliche Attraktivität für mehrere Länder oder Ländergruppen erkennbar wird.

Es ist darauf hinzuweisen, daß die Schließung des Brennstoffkreislaufs für uransparende Reaktortypen unabdingbar ist. Aus physikalischen und technischen Gründen läßt sich die Ausnutzung des Urans bzw. des Thoriums bei einmaligem Durchlauf durch den Reaktor (bis zum Erreichen des möglichen Abbrandes) nicht wesentlich gegenüber den LWR-Verhältnissen steigern. Deshalb geht es bei den Demonstrationsanlagen nicht nur um die neuen Reaktortypen selbst, sondern auch um die zu ihnen gehörende Wiederaufarbeitung und um die Refabrikation unter erhöhten Strahlenschutzanforderungen.

Um zwischen 1995 und 2000 die Auftragsentscheidungen für uransparende Reaktorsysteme treffen zu können, müßten die Demonstrationsanlagen im Rahmen des hier gewählten Zeitplan-Beispiels zwischen 1990 und 1995 ihren Betrieb aufnehmen. Dazu müßten sie sich um 1985 im Genehmigungsverfahren für den Baubeginn befinden. Dies scheint für Reaktoranlagen vom Typ SBR, HTR und LWBR zeitlich machbar zu sein. In Frankreich ist mit dem Super-Phénix ein Demonstrationsreaktor vom Typ SBR kommerziell interessanter Kapazität (1,26 GW_e) bereits im Bau. Dagegen scheint im Bereich Wiederaufarbeitung und Refabrikation die Zeit zur Schaffung der erforderlichen Voraussetzungen für ein Bau-Genehmigungsverfahren vor 1985 schon sehr knapp bemessen zu sein (vgl. Anhang 4).

Das gilt sowohl für den U-233-Thorium-Zyklus als auch für den Uran-Plutonium-Zyklus, obwohl sich letzterer teilweise auf vorliegende Erfahrungen mit dem PUREX-Verfahren abstützen kann. In beiden Fällen müssen verschiedene verfahrenstechnische Fragen zur Erstellung baureifer Unterlagen für die Einleitung von Genehmigungsverfahren für die Demonstrationsanlagen noch abgeklärt werden (Anhang 5 enthält Erläuterungen dazu). In beiden Fällen muß die wirtschaftliche Attraktivität verdeutlicht werden können. In beiden Fällen darf sich die Demonstration der Genehmigungsfähigkeit nicht nur auf spezielle Gegebenheiten eines Landes beschränken. In beiden

Fällen müssen sich die zu entwickelnden Demonstrationsanlagen in ausreichendem Maße in technische und nicht-technische Randbedingungen einpassen, die erst mit dem weiteren Verlauf der internationalen Diskussion und Verhandlungen über geeignete Maßnahmen zur Verhinderung des Spaltstoffmißbrauchs für Waffenzwecke klarer werden.

Bezüglich der Einführungsgeschwindigkeit dürften unrealistische Bereiche irgendwo zwischen Kurve b in Abbildung 4.7 ($\tau = 15a$) und dem theoretischen Grenzfall (Kurve a; $\tau = 0$) liegen. Diese Einschätzung ist in Abbildung 4.7 durch eine entsprechende Schraffur gekennzeichnet. Sie basiert auf den in Abschnitt 4.3 genannten Gründen für begrenzte Einführungsgeschwindigkeiten.

4.6 Uranbedarf für uransparende Reaktoren

Bisher ist nur auf den Uranbedarf für Leichtwasser-Reaktoren eingegangen worden, auf den sich auch die durchgezogenen Kurven in Abb. 4.7 beziehen. Der kumulierte Uranbedarf für die uransparenden Reaktortypen ist nur im Falle des Schnellen Brutreaktors übersichtlich abschätzbar, für den dieser Zusatzbedarf mit (0,5 bis 1) Mio t U⁺) bis 2100 zudem am geringsten ist. Voraussetzung ist allerdings, daß das von den LWR erzeugte Plutonium gemeinsam mit dem von SBR netto erbrüteten Plutonium ausreicht, um rechtzeitig genügend Plutonium für den Aufbau der Zyklusinventare zur Verfügung stellen zu können.

Die spezifischen Zyklusinventare (spaltbares Plutonium für den Erstkern plus "Excore"-Plutonium je GW_e) liegen zwischen etwa 3 bis 4 t Pu/GW_e (für Karbidbrüter) und 4 bis 7 t Pu/GW_e für Oxidbrüter (abhängig von Leistungsdichte, Stabdurchmesser, Abbrand, Excorezeit).

+) Zur Deckung kann das abgereicherte Rückstandsuran (tails) der Anreicherungsanlagen benutzt werden.

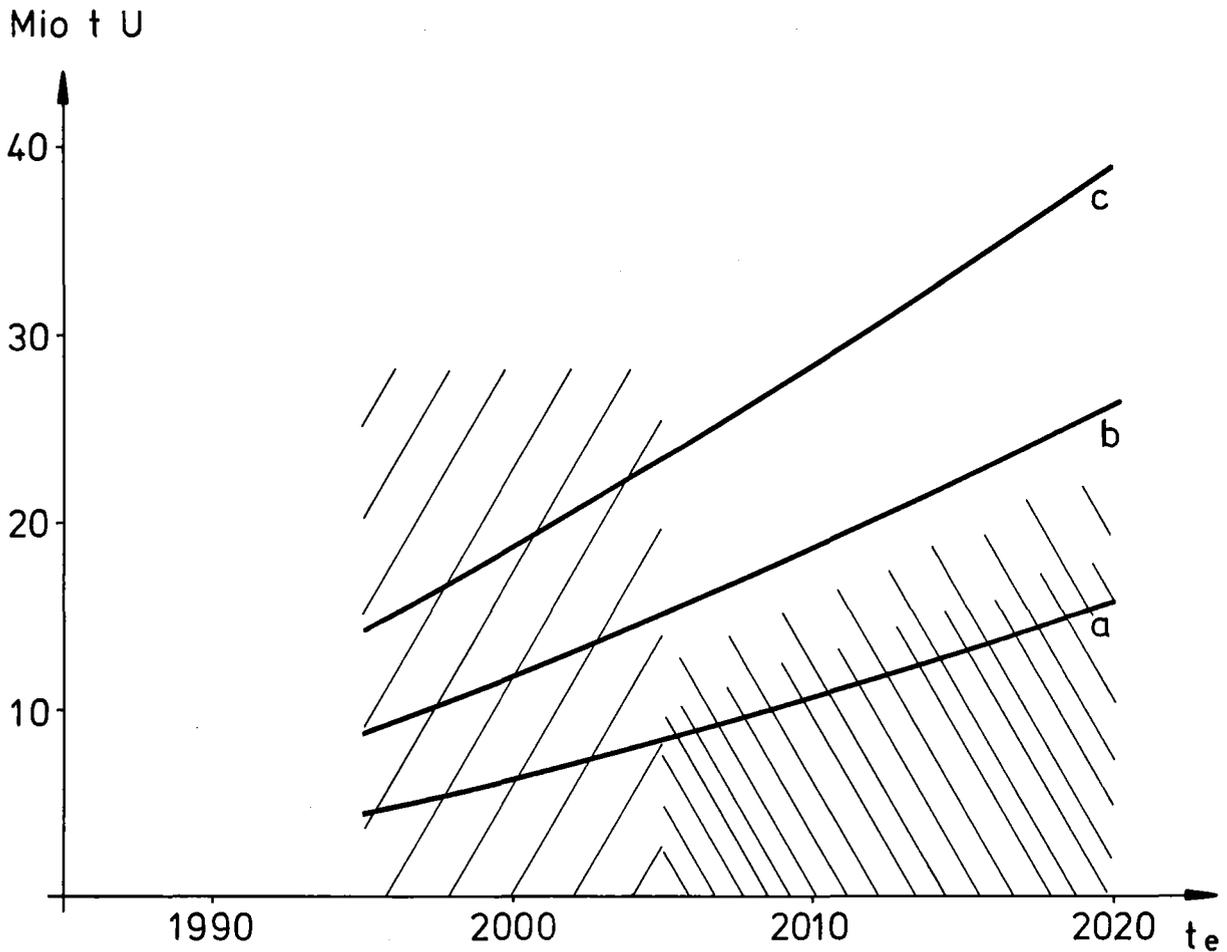


Abb. 4.7 Kumulierter Welt - Uranbedarf
(1970-2100) für LWR in Abhängigkeit
vom Einführungszeitpunkt t_e uran-
sparender Reaktoren

unrealistische Bereiche schraffiert

Ein 1 GW_e -Leichtwasserreaktor erzeugt (netto) während einer Lebensdauer von 25 Jahren 3 bis 4 t spaltbares Plutonium. Ein 1 GW_e -Oxidbrüter (Brutrate um 1,15) erzeugt in 25 Jahren einen Netto-Plutoniumüberschuß von rund 2 t^+). Wenn Brüter großtechnisch erst nach 2000 eingeführt werden, herrschen wegen ihrer begrenzten Einführungsgeschwindigkeit noch um 2020 oder 2030 Leichtwasserreaktoren vor (vgl. Abbildung 4.3). Diese Angaben dürften verständlich machen, daß Leichtwasserreaktoren bis etwa 2040 der Hauptlieferant für Plutonium zum Aufbau der Zyklusinventare von Schnellen Brutreaktoren sein werden, wenn es sich um Oxidbrüter handelt.

Bei gegebener Summe der Kapazitäten von Leichtwasserreaktoren und Schnellen Brutreaktoren bestehen dadurch Mindestanforderungen an die Installation von Leichtwasserreaktoren. Bei gegebenem Zyklusinventar an Plutonium je GW_e und bei gegebener Brutrate der Schnellen Brutreaktoren gibt es bestimmte Kombinationen von Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit für Schnelle Brutreaktoren, bei denen gerade genügend Plutonium für den Aufbau der Zyklusinventare der Schnellen Brutreaktoren zur Verfügung steht.

Solche Kombinationen sind in Abbildung 4.8 als gestrichelte Linien für drei Zyklusinventare (4 t Pu/GW_e , 5 t Pu/GW_e und 6 t Pu/GW_e^{++}) eingezeichnet. Soweit es aus technischen Gründen nicht möglich sein wird, die Zyklusinventare unter gewisse Mindestinventare für spaltbares Plutonium zu drücken, sind die entsprechenden Inventarlinien in Abbildung 4.8 als Randbedingungen zu interpretieren, die einen Mindestbedarf an Uran festlegen.

Ein Zahlenbeispiel mag dies verdeutlichen: Sollte es sich als nicht möglich erweisen, die Zyklusinventare für Schnelle Brutreaktoren unter etwa $4,8 \text{ t Pu/GW}_e$ zu drücken, so würde eine als zeitlich machbar erachtete Kombination von Einführungszeitpunkt 2005 und Einführungsgeschwindigkeit nach Kurve b ($\tau = 15a$) nicht genügend Plutonium zum rechtzeitigen Aufbau

⁺) Dies entspricht bei einem Zyklusinventar von $5,5 \text{ t Pu/GW}_e$ einer Verdopplungszeit von etwa 50 Jahren für ein hypothetisches, ^eexponentiell wachsendes SBR-System ohne LWR.

⁺⁺) Die Angaben über Plutoniuminventare beziehen sich auf die spaltbaren Plutoniumisotope.

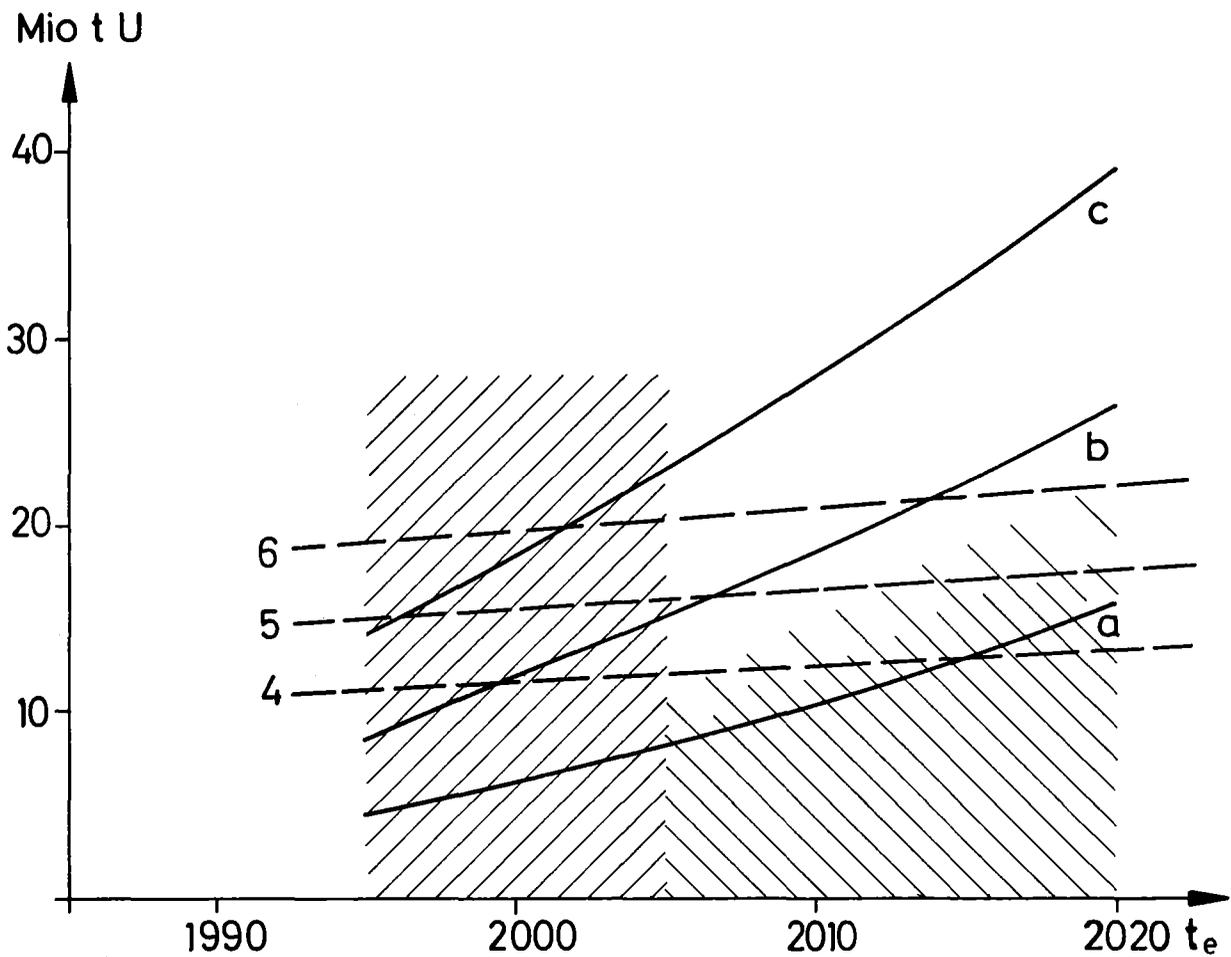


Abb. 4.8 Kumulierter Welt - Uranbedarf
(1970 - 2100) für LWR in Abhängigkeit
vom Einführungszeitpunkt t_e uran-
sparender Reaktoren

unrealistische Bereiche schraffiert

4, 5, 6 : Zyklusinventare [t Pu*/GWe] für SBR
(gestrichelte Linien)

*spaltbarer Pu - Anteil

der SBR-Inventare liefern. In diesem Falle müßte die Verdrängung von Leichtwasserreaktoren entweder später einsetzen oder langsamer erfolgen. Der zeitlich summierte Uranbedarf müßte entsprechend über 15 Mio t steigen.

Im Sinne einer qualitativen Zusammenfassung der in Abbildung 4.8 enthaltenen Informationen ist zu sagen: Bei gegebenem Umfang des Kernenergieeinsatzes (hier speziell nach Abbildung 4.1) ergibt sich eine Mindestmenge zeitlich summierten Uranbedarfs für Leichtwasserreaktoren, die durch Anstoßen an mindestens eine von drei Randbedingungen markiert wird. Diese Randbedingungen sind (in etwas allgemeiner Formulierung):

- Zeitliche Machbarkeit eines rechtzeitigen effektiven Einführungszeitpunktes uransparender Reaktoren
- Realisierbarkeit einer raschen Einführung
- Mindestanforderungen an die Erzeugung von Spaltstoff durch Reaktoren mit LWR-typischer Bedarfscharakteristik für Zyklusinventare uransparender Reaktortypen.

Welche der in Abbildung 4.8 dargestellten Randbedingungen für den Mindesturanbedarf letztlich ausschlaggebend sein wird (bzw. sein werden), ist noch ungewiß. Das obengenannte Zahlenbeispiel (Einführungszeitpunkt 2005, $\tau = 15a$, SBR-Zyklusinventar $4,8 \text{ t Pu/GW}_e$, kumulierter Uranbedarf 15 Mio t) entspricht einer optimistischen Einschätzung. Geht man etwas weniger optimistisch davon aus, daß das SBR-Zyklusinventar auch längerfristig gegenwärtigen Referenzdaten für den SNR 2 (ca. 6 t Pu/GW_e) entspricht, so würde man bei einem Einführungszeitpunkt $t_e = 2005$ etwa 20 Mio t U benötigen.

Ursache für den dabei deutlich höheren kumulierten Uranbedarf ist, daß die uranintensiven LWR nur langsamer durch SBR substituiert werden können, als dies bei kleineren spezifischen Zyklusinventaren möglich ist.

Insgesamt ist es kaum möglich, bei Verwirklichung des betrachteten Modells mit weniger als 15 Mio t U auszukommen. Davon würden 4,7 Mio t U bis zum betrachteten Einführungszeitpunkt 2005 anfallen (vgl. Abbildung 4.5).

Die bisherige Diskussion des Mindestbedarfs an Uran anhand von Abb. 4.8 bezog sich auf SBR mit oxidischem Brennstoff, auf die sich die technische Entwicklung der SBR gegenwärtig konzentriert. Karbidbrüter haben das technische Potential, mit geringeren spezifischen Zyklusinventaren (3 bis 4 t Pu/GW_e) auskommen zu können. Darüber hinaus können sie höhere Brutraten ($\approx 1,4$) und einen entsprechend höheren Nettoausstoß an Plutonium (≈ 250 kg Pu/GW_e·a) erreichen. Demzufolge ist das Ausbautempo einer möglichen Karbidbrüterlinie technisch in weit geringerem Umfang an Pu-Inventarlieferungen aus Leichtwasserreaktoren gebunden als eine Oxidbrüterlinie. Bei Verfolgung einer Karbidbrüterlinie wird der Mindestbedarf an Uran nicht durch die Bereitstellung des Systeminventars an Spaltstoff (Pu) durch "vorbrütende", uranintensive Leichtwasserreaktoren bestimmt, sondern durch die erreichbare Einführungsgeschwindigkeit. Für ein geschlossenes Karbidbrütersystem sind jedoch rund 10 Jahre mehr bis zum kommerziellen Einsatz zu veranschlagen als für ein Oxidbrütersystem.

Ein hypothetischer Karbidbrütereinsatz in 2015 führt, je nach Einschätzung der erreichbaren Einführungsgeschwindigkeit, nach Abbildung 4.8 auf einen kumulierten Uranbedarf von mindestens 16 bis 20 Mio t U.

Die dabei entstehenden Plutoniummengen übersteigen das für den Aufbau der Zyklusinventare erforderliche Maß. Dadurch ist es möglich, einen Teil dieses Plutoniums in LWR zu rezyklieren und auf diese Weise insgesamt rund 2 Mio t Natururan einzusparen. Der kumulierte Uranbedarf von 14 bis 18 Mio t U, der sich nach Verrechnung dieser Plutoniumgutschrift ergibt, unterscheidet sich auf Grund der Zeitverzögerung kaum von dem der zuvor behandelten Oxidbrüterlinie.

Als uransparende Reaktorlinien kommen auch solche in Betracht (HTR, LWBR), die überwiegend U-233 als Spaltstoff benutzen.

Die Konversionsrate solcher Reaktoren kann aus physikalischen und technischen Gründen nur dann in den Bereich 1,0 (größer als etwa 0,95 oder vielleicht etwas größer als 1,0) gebracht werden, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Als Spaltstoff muß U-233 (nicht U-235) vorherrschen;
- der Abbrand muß geringer als bei Leichtwasserreaktoren sein ($\leq 2,5$ % des eingesetzten Brennstoffs).

Der Spaltstoff U-233 kommt in der Natur nicht vor. Er kann durch Neutronenbeschuß aus dem natürlichen Nuklid Th-232 in Reaktoren erzeugt werden, deren Spaltstoff U-235 ist. Solche Reaktoren erfordern für ihren Betrieb ähnlich viel Uran wie Leichtwasserreaktoren (≈ 150 t U jährlich bei einem Lastfaktor von 0,7).

Die folgenden Angaben beziehen sich speziell auf das HTR-Vorbrüter-Nahebrüter-System. Daten zur Kennzeichnung des Uranbedarfs für dieses System sind nach /KOLB, G. (1977)/ in Anhang 3 zusammengestellt.

Aus den Daten kann man entnehmen, daß 410 t Natururan im Vorbrüter gebraucht werden, um 1 t U-233 für den Nahebrüter bereitzustellen. Zur Bereitstellung des Zyklusinventars für Nahebrüter (4,24 t U-233/GW_e) sind daher 1740 t Natururan erforderlich.

Wenn das Vorbrüter-Nahebrüter-System nach einer Aufbauphase im Gleichgewicht ist, kann (bei angenommenen Kreislaufverlusten von 1 %) ein Vorbrüter etwa 10 Nahebrüter mit U-233 versorgen. Zu einem solchen System (1/11 GW_e Vorbrüter + 10/11 GW_e Nahebrüter) gehört folgende Brennstoffcharakteristik:

Zyklusinventar an Uran	1630 t U _{nat} /GW _e
Zyklusinventar an Thorium	790 t Th/GW _e
Nachladebedarf an Uran	20 t U _{nat} /GW _e · a
Nachladebedarf an Thorium	1,3 t Th/GW _e · a

Das angegebene Zyklusinventar an Uran enthält den Nachladeeinsatz an Uran in Vorbrütern zur Erzeugung des anteiligen U-233-Zyklusinventars für Nahebrüter.

Für den Fall, daß 2100 die gesamte installierte Kapazität (in dem hier betrachteten Modell etwa 6500 GW_e) durch dieses System abgedeckt würde, wären 10,6 Mio t Natururan zum Aufbau der Zyklusinventare erforderlich.

Der bis 2100 zeitlich summierte Uran-Nachladebedarf hängt von Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit des Systems ab. Bei dem spezifischen Nachladebedarf von 20 t U/GW_e·a ist größenordnungsmäßig mit 5 Mio t Uran bis 2100 für die Nachladungen zu rechnen.

Die sich ergebende Summe von 15 Mio t U_{nat} darf jedoch aus drei Gründen nicht einfach dem Leichtwasserreaktor-Bedarf nach Abbildung 4.8 zugeschlagen werden. Erstens ist schwer zu übersehen, ob und in welchem Umfang Vorbrüter bereits vor 2005 eingeführt werden können (dadurch würde der bis 2100 zeitlich summierte Leichtwasserreaktor-Bedarf verringert werden). Zweitens würde im Falle des betrachteten Hochtemperaturreaktor-Systems das aus den Leichtwasserreaktoren entladene Plutonium nicht für Schnellbrüter-Inventare gebraucht, sondern stände zur Rezyklierung in Leichtwasserreaktoren zur Verfügung. Je nach Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit des Hochtemperaturreaktor-Systems können dadurch 2 bis 6 Mio t U_{nat} gespart werden. Drittens kommen als Vorbrüter auch bestehende Leichtwasserreaktoren in Betracht, wenn in ihnen vorwiegend Thorium als Brutstoff verwendet wird.

Es sei darauf hingewiesen, daß das spezifische Erstkerninventar für Leichtwasserbrutreaktoren /BATTELLE-COLUMBUS (1976)/ um etwa 50 % höher als der angegebene Wert für Nahebrüter ist. Dadurch würde der Uranbedarf für den Aufbau der Zyklusinventare noch stärker ins Gewicht fallen als im Falle der Nahebrüter. Mit der in /BATTELLE-COLUMBUS (1976)/ angegebenen Konversionsrate von 1,01 würde allerdings der Nachladebedarf des Leichtwasserbrutreaktors geringer sein als der des Hochtemperatur-Nahebrüters (Konversionsrate: 0,97).

Die Angaben über hochkonvertierende U-233-Thorium-Systeme wurden zu Orientierungszwecken gemacht. Sie verdeutlichen, daß der Uranbedarf dieser Systeme bis 2100 um größenordnungsmäßig 10 Mio t höher liegt als der für Schnelle Brutreaktoren.

Damit ist der Gesamt-Uranbedarf bis 2100 nicht nur von Einführungszeitpunkt und Einführungsgeschwindigkeit der uransparenden Reaktortypen, sondern deutlich auch von der Art der uransparenden Reaktortypen abhängig.

Eine deutliche Verringerung dieses Bedarfs (theoretisch um 35 %) könnte dann erreicht werden, wenn es gelänge, durch Anreicherung mit dem LASER-Trennverfahren vorteilhafte Anreicherungsbedingungen zu erreichen. Dieses Verfahren befindet sich gegenwärtig in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Es ist noch unklar, ob und wann dieses Verfahren zu einem großtechnischen Einsatz entwickelt werden kann /JAEK, W., u.a. (1977)/. In den bereits eingesetzten Trennanlagen läßt sich der Uranbedarf durch Verringerung des tails-Gehalts an U-235 etwas reduzieren. Ein Übergang von 0,25 % (wie hier immer angenommen) auf 0,20 % würde den Uranbedarf um etwa 10 % verringern. Allerdings steigen dabei die Trennarbeitskosten je kg angereicherten Urans.

5. Die Uranvorräte der Welt und ihre Verfügbarkeit

5.1 Uranvorräte

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.

Tabelle 5.1 enthält jüngere Angaben /BGR (1976), OECD (1977)/ über die Weltvorräte für unterschiedliche Gewißheitsgrade.

Tabelle 5.1: Uranvorräte der Welt ^{+) in 10⁶t}
Gewinnungskosten \leq 130 \$/kg U⁺⁺⁾

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

Als sichere Vorräte werden solche bezeichnet, die in bekannten Lagerstätten vermessen wurden und mit derzeitiger Technologie gewinnbar sind. Der gegenwärtig wirtschaftlich gewinnbare Teil davon (\leq 80 \$/kg U⁺⁺⁾) wird als "Reserven" bezeichnet (rund 2 Mio t U).

Geschätzte zusätzliche Vorräte sind solche, die für nicht vermessene Teile bekannter Lagerstätten oder unbekanntes Vorkommen innerhalb von Lagerstättenprovinzen geschätzt wurden.

^{+) Incl. Ostblockländer und China}

^{++) 78 \$/kg U \cong 30 \$/1b U₃O₈, 130 \$/kg U \cong 50 \$/1b U₃O₈}

Die prognostischen Vorräte sind Einschätzungen auf der Basis von bekannten Lagerstätten, geologischen Gegebenheiten und dem jeweiligen Explorationsgrad.

Die in Tabelle 5.1 auftretenden Datenspannen dürfen nicht als Unsicherheitsspannen interpretiert werden. Es handelt sich um Spannen angegebener Einzelzahlen ohne Genauigkeitsangaben. Die wirklichen Unsicherheiten dürften deutlich größer sein als die angegebenen Zahlenspannen. Dazu trägt bei, daß nicht alle Minengesellschaften ihre Daten vollständig den nationalen Institutionen zur Verfügung stellen und nicht alle Länder bereit sind, über die auf ihren Territorien lagernden Vorräte umfassend zu informieren. Die Unsicherheiten der Informationsbasis für konkrete Einzelschätzungen kommen hinzu.

Da auch die prognostischen Vorräte auf konkreten lokalen oder zumindest regionalen Hinweisen fußen und die Mengenschätzungen dafür wohl vorsichtig sind⁺), können weitere Prospektionsaktivitäten künftige Einschätzungen der Vorräte erhöhen. Allerdings wurden bereits die meisten der als hoffig bekannten Teile der Erdoberfläche (jedenfalls in westlichen Ländern) übersichtsmäßig prospektiert /VENZLAFF, H. (1976)/.

Bisher wurden 15 % - 20 % der hoffigen Gebiete der Erde intensiv exploriert /BGR (1976)/. Seit den 50er Jahren sind nur wenige wirklich größere Lagerstätten gefunden worden (Australien Ende der 60er Jahre), obwohl die Prospektionsmethoden in dieser Zeit stark verbessert und der Aufwand vergrößert wurde (vgl. /FINCH, W.J., et al. (1975)/).

Spekulative Hochrechnungen für nach heutigen Maßstäben wirtschaftlich abbaubare Uranvorkommen der Erde führen in die Größenordnung von 50 bis 300 Mio t U. Die gegenwärtigen Methoden für diese Hochrechnungen sind jedoch sehr angreifbar. Es ist möglich, daß der größte Teil der abbaubaren

⁺) Allein für Australien werden neuerdings 4 Mio t U genannt, die zu niedrigen Kosten gewinnbar sein sollen (Aussagen des australischen Rohstoffministers laut Handelsblatt vom 6.6.78).

Lagerstätten bisher unentdeckt blieb und daß noch mehrere 10 Mio t U gefunden werden können. Die vorliegenden spekulativen Hochrechnungen können jedoch nicht als belastbare Aussagen dafür angesehen werden.

In Tabelle 5.2 sind Mengenangaben /BGR (1976)/ über bekannte Armerzvorkommen der westlichen Welt nach Aufgliederung in zwei Konzentrationsbereiche (100 bis 500 ppm⁺) und 10 bis 100 ppm) zusammengestellt. Die dort in "Konzentrationsbereich 1" aufgeführten Zahlen stellen den Anteil der westlichen Welt an den in Tab. 5.1 aufgeführten gegenwärtig wirtschaftlich abbaubaren Vorräten der Welt dar.

Schätzungen über die Gewinnungskosten der Konzentrationsbereiche 2 und 3 sind unsicher. Sie hängen nicht nur von der Konzentration, sondern auch sehr wesentlich von den lokalen Abbaubedingungen und der industriellen Infrastruktur ab. Die in der Tabelle 5.2 enthaltenen Kostenangaben sind daher nur als Orientierungsdaten zu verstehen.

Der überwiegende Teil der identifizierten Armerzvorkommen liegt im Konzentrationsbereich 3. Mengenmäßig bedeuten die Armerzvorkommen im Konzentrationsbereich 2 mit 8 Mio t U eine deutliche Erweiterung der Ressourcenbasis.

Der größte Teil der in Tabelle 5.2 aufgeführten Uranvorkommen des Konzentrationsbereiches 2 ist gegenwärtig jedoch nur als Nebenprodukt bei der Phosphorsäureherstellung aus Rohphosphaten wirtschaftlich gewinnbar.⁺⁺)

Bei möglichen Versorgungsgaps und entsprechender Entwicklung der Uranpreise könnten diese Vorräte auch als Hauptprodukt gewonnen werden, ohne die Kernenergie dabei - auch bei Einsatz von Leichtwasserreaktoren -

+) ppm U im Erz

++) Mit gegenwärtiger Technologie der Extraktion von Uran aus Phosphorsäure ergeben sich bei 150 ppm U im Rohphosphat und Anlagengrößen von mehr als 300 000 tato P₂O₅ Zusatzkosten für die Urangewinnung von ca. 40 \$/kg U.

Tabelle 5.2: Uran-Ressourcenbasis der westlichen Welt in Mio t

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

- 70 -

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)/

untragbar teuer zu machen.⁺⁾ Hinzu kommt, daß man wohl noch mit beträchtlichen Zufunden für die Konzentrationsbereiche 2 und 3 rechnen kann, da die Suche nach Uranvorkommen bisher überwiegend dem Konzentrationsbereich 1 gilt. Angaben über "prognostische" Vorräte an Armerzen liegen nicht vor.

Es ist möglich, aber durchaus nicht sicher, daß der Umfang der Ressourcenbasis bei Uran mit abnehmender Urankonzentration wegen spezifischer Gegebenheiten der Lagerstättenbildung durch natürliche Konzentrationsprozesse nicht in dem Maße zunimmt, wie dies bei vielen anderen mineralischen Rohstoffen der Fall ist /HAMESTER, H.L., et al. (1975)/.

Bei den angegebenen Vorräten für Konzentrationsbereich 3 handelt es sich überwiegend um Vorkommen in den USA (in Schiefen, z.B. bei Chattanooga, und Graniten), enthalten sind auch die geschätzten Uranmengen in Bodenschlämmen des Schwarzen Meeres (türkischer Teil) und in Phosphaten.

Welcher Anteil der Vorkommen im Konzentrationsbereich 3 jemals zur Nutzung in Leichtwasserreaktoren gefördert werden kann, ist nicht nur aus Kosten- und Umweltschutzgründen unsicher, sondern auch aus Gründen der Netto-Energiebilanz.

Beim Einsatz gegenwärtiger Gewinnungstechnologien liegt die Konzentrationsgrenze von Uranlagerstätten, ab der ebensoviel Primärenergie zur Gewinnung von Uran aufgebracht werden muß, wie in Leichtwasserreak-

⁺⁾ Aufgrund der gegenwärtigen Kosten für die Phosphatgewinnung, für die Produktion von Phosphorsäure und für die Uranextraktion lassen sich bei 150 ppm U in Rohphosphaten Urangewinnungskosten um 400 \$/kg U für den Fall abschätzen, daß das Rohphosphat nur wegen seines Urangehalts gefördert und verarbeitet wird. Diese Angabe gilt für Länder mit entwickelter industrieller Infrastruktur.

toren freigesetzt wird, bei rund 20 ppm. Je nach spezifischen Gegebenheiten der Lagerstätte kann sich diese Konzentrationsgrenze jedoch um mehr als einen Faktor 2 verschieben /MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, MITTELSTAND UND VERKEHR (1977).

Die Angaben in Tabelle 5.2 beschränken sich auf terrestrische Vorkommen. Zur Gewinnung des in geringer Konzentration (0,003 ppm) im Meerwasser enthaltenen Urans werden gegenwärtig nur Verfahren in Betracht gezogen, die zum Bewegen des Meerwassers durch die Filteranlagen entweder Meeresströmungen oder Tidenhub ausnutzen. Dabei dürfen die lokalen Gegebenheiten nicht zu einer Rückvermischung mit abgereichertem Meerwasser führen. Die Anzahl möglicher Standorte für solche Anlagen liegt weltweit unter 100. Das weltweite Potential für Meerwasser-Uran wird gegenwärtig auf 25 000 t U/a geschätzt /LLEWELYN, G. (1975)/. Wegen des absehbar geringen Beitrags zur Uranversorgung wird das Meerwasser-Uran hier nicht weiter diskutiert.

5.2 Statische Beurteilung der Vorratssituation

Der in Kapitel 4 näher untersuchte Umfang des weltweiten Kernenergieeinsatzes führte zu einem bis 2100 zeitlich summierten Mindestbedarf von 15 Mio t U. Je nach Art und Einführungsbedingungen uransparender Reaktoren können diese 15 Mio t U auch deutlich überschritten werden. Es sei daran erinnert, daß das betrachtete Modell um 2000 mit Schätzungen übereinstimmt, die 1977 auf der Welt-Energiekonferenz genannt wurden. Nach 2000 liegt der untersuchte Kernenergieeinsatz jedoch unterhalb der WEC-Schätzungen (vgl. Abschnitt 4.1) und ist im Zeitverlauf bis 2025 vergleichbar mit der unteren Schätzung von /OECD (1977)/. Dem Mindestbedarf von 15 Mio t U liegt also eine vergleichsweise zurückhaltende Vorstellung über den künftigen Umfang des Kernenergieeinsatzes zugrunde.

Bei einem Vergleich dieser 15 Mio t U mit den unter gegenwärtigen Bedingungen wirtschaftlich gewinnbaren Vorräten (vgl. Tabelle 5.1) ergibt

sich, daß die sicheren Vorräte von etwa 2,5 Mio t U nur einen kleinen Teil zur Bedarfsdeckung beitragen können.

Zur Erweiterung der Reserven steht noch Zeit zur Verfügung, in der zumindest ein Teil der geschätzten zusätzlichen und der prognostischen Vorräte durch Exploration in die Kategorie der sicheren Vorräte überführt werden kann. Sollten sich die gesamten 11 oder 12,5 Mio t U nach Tabelle 5.1 identifizieren und wirtschaftlich fördern lassen, so wäre damit bereits der größte Teil der diskutierten 15 Mio t U abgedeckt. Wenn man zunächst vom Problem der rechtzeitigen Förderung absieht, gelangt man durch Addition der in der westlichen Welt im Konzentrationsbereich 2 (vgl. Tabelle 5.2) identifizierten 8 Mio t U bereits auf einen Ressourcenumfang von etwa 20 Mio t U. Darüber hinaus ist mit Uranvorräten östlicher Länder im Konzentrationsbereich 2 und weltweiten Zufunden in diesem Konzentrationsbereich zu rechnen.

Die in Tabelle 5.2 zur Orientierung aufgeführten Gewinnungskosten von 400 bzw. 600 $\text{§} / \text{kg U}$ für die Grenze zwischen den Konzentrationsbereichen 2 und 3 würden bei Leichtwasserreaktoren zu einem Urankostenanteil an den Stromerzeugungskosten von etwa 3 bzw. 4,5 Dpf/kWh führen, sofern die Uranpreise nicht wesentlich über den Gewinnungskosten liegen. Dieser Kostenanteil ist zumindest dann nicht prohibitiv, wenn die übrigen Kosten des Brennstoffkreislaufs nicht gleichzeitig gegenwärtige Werte stark überschreiten. Bei möglicher Weiterentwicklung der Gewinnungstechnologie kann vielleicht auch ein Teil der Uranvorräte im Konzentrationsbereich 3 zu akzeptablen Kosten genutzt werden.

In welchem Maße auf Uranvorräte im Konzentrationsbereich 3 zurückgegriffen werden muß, hängt außer von Zufunden bei höheren Konzentrationen von der Art und den Einführungsbedingungen uransparender Reaktortypen ab.

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

Bei näherer 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. (Auf Fragen der geopolitischen Verteilung der Uranvorkommen wird in Abschnitt 5.5 eingegangen.)

5.3 Erforderliche Zufundraten

Nach Abbildung 4.5 werden bis 2020 kumuliert bereits 8,5 bis 10 Mio t Uran für Leichtwasserreaktoren bei dem betrachteten Modell und der dort genannten Einführungsgeschwindigkeit benötigt. Die entsprechenden Reserven müßten etwa 10 Jahre vorher gesichert sein, um die Bauzeit für die Minen und eine Mindestmenge für 5 bis 10 Betriebsjahre abzudecken. In diesem Sinne sind die gestrichelten Kurven in Abbildung 4.5 zu verstehen, bei denen eine Vorlaufzeit von 12 Jahren angenommen wurde.

Die gegenwärtigen sicheren Vorräte betragen etwa 2,5 Mio t U (vgl. Tabelle 5.1). Für den betrachteten Modellfall müßten also innerhalb der nächsten 30 Jahre zusätzlich 6 bis 7,5 Mio t U als Reserven identifiziert werden. Das bedeutet, daß im Durchschnitt der nächsten 30 Jahre jährlich 0,2 bis 0,25 Mio t U durch entsprechende Explorationsaufwendungen in Reserven überführt werden müssen. Die durchschnittliche Zufundrate der westlichen Welt lag zwischen 1970 und 1975 bei etwa 100 000 t U/a /OECD (1975)/.⁺⁾

Die Zeit zwischen Beginn der Prospektion in hoffigen Gebieten und dem Beginn der Produktion von Urankonzentraten ist mit etwa 10 - 15 Jahren zu veranschlagen /OECD (1975)/.

⁺⁾ Teilweise sind in dieser Zahl Funde von vor 1970 enthalten, die damals noch nicht als wirtschaftlich abbaubar galten, deren Anteil unter anderem durch ständige Umbewertungen schwer abschätzbar ist.

Diese lange Vorlaufzeit erschwert die Anpassung von Prospektionsentscheidungen an die erst später deutlicher erkennbare Bedarfsentwicklung.

Die erforderliche Ausweitung der Reservenzufuhr muß in einer Situation erfolgen, in der gleichzeitig die spezifischen Aufwendungen dafür wachsen. Diese Situation kann anhand der Entwicklung der Verhältnisse in den USA etwas näher beschrieben werden /ERDA (1976a)/:

- Die Bohrungen zur Suche nach Uran werden ständig tiefer getrieben. Während 1964 nur 15 % der Bohrungen etwa 150 m Tiefe überschritten, waren es 1975 über 60 %. Bohrungen mit einer Tiefe \geq 600 m hatten 1975 bereits einen Anteil von 15 %.
- Im Zeitraum zwischen 1967 und 1975 ist die Zufundrate je Bohrmeter auf weniger als die Hälfte abgesunken (für inflationsbereinigte Förderkosten von \leq 39 \$ /kg U).
- Die mittlere Urankonzentration des verarbeiteten Erzes ist von 2000 ppm U im Jahre 1966 auf 1300 ppm U in 1976 abgesunken.
- Die durchschnittlichen Gewinnungskosten (inflationsbereinigt) für zugefundene Reserven werden ständig höher.

Am intensivsten wird gegenwärtig in den Industrieländern nach Uran gesucht. Dies gilt insbesondere für die USA. Von den in der westlichen Welt zwischen 1970 und 1974 niedergebrachten Bohrm Metern entfielen über 90 % auf die USA /OECD (1975)/. Das 1974 von der damaligen AEC begonnene und von der ERDA fortgeführte NURE⁺-Programm /ERDA (1976b)/ verdeutlicht die starke staatliche Unterstützung der für die Privatwirtschaft risikoreichen Prospektion nach Uran. In Europa wird die Uransuche neben staatlicher Förderung neuerdings auch durch EG-Finanzierungen gestützt.

+) NURE = National Uranium Resource Evaluation

Soweit jedoch mit größeren Uranfunden gerechnet wird, konzentrieren sich die Hoffnungen eher auf abgelegene Gebiete in Entwicklungsländern als auf Industrienationen. In den Entwicklungsländern treten zusätzliche Schwierigkeiten für die Uran-Prospektion auf, die teils politischer Art sind.

Angesichts der genannten Schwierigkeiten dürfte es alles andere als leicht sein, die für die hier betrachtete Modellentwicklung erforderliche rasche Steigerung der jährlichen Zufunde zu erreichen, .

5.4 Ausbau der Förderkapazität

Es wurde bereits in Abschnitt 4.4 darauf hingewiesen, daß der jährliche Leichtwasserreaktor-Uranbedarf bei dem betrachteten Kernenergieeinsatz bis 2010 um etwa einen Faktor 10 auf 0,3 Mio t U/a gesteigert werden muß. Ähnliches gilt für die Förderkapazität. Dabei sind - außer den besprochenen erforderlichen Neufunden - mögliche Engpässe:

- Kapitalbedarf (auch Bedingungen für ausländische Beteiligungen)
- Investitionsbereitschaft (ungewisse Marktentwicklung, Exportlinien für Uran)
- Technologieentwicklung zur Urangewinnung aus unkonventionellen Lagerstätten^{+))}
- nationale und regionale Genehmigungsprobleme, etwa in Zusammenhang mit Umweltschutz und Akzeptanz durch nahwohnende Bevölkerung (auch Schutzgebiete für ethnische Minderheiten)
- geeignete Arbeitskräfte (in entlegenen Gebieten)
- regionale Infrastruktur.

+))

Es gibt z.B. afrikanische Lagerstätten, in denen das Uran stärker im Begleitgestein konzentriert ist als im eigentlichen Phosphat. Technologien für die Extraktion von Uran aus dem Phosphat sind bekannt, solche für die Extraktion aus dem durch Waschung aussortierten Begleitgestein sind nicht bekannt.

Der erwartbare Übergang zur Gewinnung von Uran aus ärmeren Erzen hat zur Folge, daß die Mengen uranhaltigen Gesteins, die jährlich gefördert, gemahlen und chemisch aufbereitet werden müssen, noch rascher steigen als die jährliche Uranproduktion.

Ein Beispiel soll damit verbundene Mengenprobleme verdeutlichen.

Innerhalb des Konzentrationsbereiches 2 (vgl. Tabelle 5.2) stellen die Uranvorkommen in den Phosphat-Lagerstätten Marokkos mit 4,8 Mio t U den Hauptbeitrag zu den identifizierten Vorräten dar. Eine hypothetische Produktion von 30 000 t U/a (etwa 10 % der Weltförderung 2010) würde bei typischen Urankonzentrationen von 150 ppm U die jährliche Verarbeitung von 200 Mio t Rohphosphat (300-400 Mio t Phosphatgestein) erfordern. Bei 200 Fördertagen pro Jahr wären das 1 Mio t pro Tag.

Zum Vergleich: Die Jahreskapazität großer amerikanischer und der beiden marokkanischen Phosphatgewinnungsanlagen liegt bei 7 Mio t Rohphosphat. Für das diskutierte Beispiel müßte Marokko etwa 30 solcher Großanlagen in Betrieb haben. Dabei würden jährlich etwa 60 Mio t P_2O_5 anfallen, die mit der gegenwärtigen Weltproduktion von 20 Mio t P_2O_5 /a zu vergleichen sind.

Die jährliche Verarbeitung von 200 Mio t Rohphosphat wäre mehr als das 10-fache der für die Urangewinnung in der westlichen Welt 1976 verarbeiteten Uranerze, die zu einer Jahresproduktion von 23 000 t U führte.

Zur Aufarbeitung der großen Gesteinsmengen müßten entsprechend große Mengen an Chemikalien transportiert, gehandhabt und neutralisiert werden. Welche zusätzlichen Aufwendungen bei diesem Beispiel für eine mögliche gleichzeitige Phosphatgewinnung oder eine geeignete Lagerung aufgebracht werden müssen, bleibt hier offen.

Ähnliche Mengenprobleme würden z.B. bei der Ausbeutung der ärmeren Schiefer in Schweden entstehen, wobei die Anforderungen an Umweltschutzmaßnahmen und Rekultivierung der Landschaft nicht vergessen werden dürfen.

Hinsichtlich der erforderlichen Bewegung von Gesteinsmengen ist andererseits darauf hinzuweisen, daß es in den Industrieländern heute schon Beispiele für die Bewältigung noch größerer Mengen gibt (Kohleförderung) als im Fall der Phosphat-Lagerstätten Marokkos gegebenenfalls anfallen würden. Die Ausweitung der chemikalien-intensiven Phosphatproduktion in den USA von gegenwärtig 40 Mio t /a auf 200 Mio t /a wird von Experten in weniger als 30 Jahren für möglich gehalten.

Weder die Mengenprobleme noch die eingangs stichwortartig genannten anderen 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 Reservensituation 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 erkennbaren Uranvorkommen (Reserven) nicht oder stark verzögert zur jeweils technisch möglichen Produktion von Urankonzentrat gelangt.

5.5 Geographische Verteilungsstruktur bei Uranbedarf und Uranversorgung

Gegenwärtig entfallen etwa 95 % des Uranbedarfs der westlichen Welt auf die USA, Westeuropa und Japan. Dabei entfallen auf Westeuropa und Japan 39 % des Bedarfs. Diesen 39 % (vgl. Tabelle 5.3) steht nur ein Anteil von etwa 8 % an der Uran-Produktionskapazität gegenüber. Die USA importieren gegenwärtig mehr Uran, als sie exportieren. Die wichtigsten Netto-Lieferanten sind Afrika und Kanada, die zusammen etwa 46 % der gegenwärtigen Produktionskapazität der westlichen Welt haben (gegenüber 4 % am Uranbedarf). Dies sind vorerst auch die wichtigsten Lieferländer für die Bundesrepublik Deutschland.

Tabelle 5.3: Gegenwärtige Anteile der installierten Kernenergiekapazität und der Uran-Produktionskapazität für Länder bzw. Ländergruppen der westlichen Welt⁺⁾

	Anteil an der installierten Kapazität (1977) in %	Anteil an der Uran-Produktionskapazität (1977) in %
USA	56	44
Kanada	4	18
Afrika	-	28
Australien	-	1
Westeuropa	30	8
Japan	9	-
Rest westl. Welt	1	1
	100	100

⁺⁾ Quelle /OECD (1977)/

In Tabelle 5.4 sind Angaben zusammengestellt, aus denen man mittelfristige Tendenzen für die Entwicklung der Verteilungsstruktur bei Uranbedarf und Uranversorgung erkennen kann. Dabei werden mögliche Uranlieferungen aus den Ostblockländern und China nicht angesprochen. Bisher liegen keine Uranexporte aus diesen Ländern in die westliche Welt vor. Außerdem sind Angaben über Uranvorräte dieser Länder sehr lückenhaft.

Tabelle 5.4: Verteilung von Uranbedarf und Uranversorgung auf die westliche Welt für 1985⁺)

	Anteil an der installierten Kapazität in %	Mögl. Anteil an der Uran-Pro- duktionskapazi- tät in %	Anteil an den Uran- Vorräten ⁺⁺⁾ 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 aus der Tabelle erkennbaren Entwicklungstendenzen sind:

- Bei sinkendem Anteil an der Produktionskapazität (von 8 % auf 6 %) erhöhen Westeuropa und Japan ihren Bedarfsanteil von 39 % auf 48 %.

+) Quelle: /OECD (1977)/

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

- Nach Schätzungen der möglichen Produktionskapazität (Spalte 2 von Tabelle 5.4) tritt Australien als bedeutsames Exportland für Uran hinzu, während Kanada und Afrika etwas an ihren relativen Anteilen am Versorgungspotential verlieren.

Die Zahlen, insbesondere die für die Anteile an der Produktionskapazität, sind mit Unsicherheiten behaftet, von denen einige nachfolgend etwas erläutert werden.

Es ist möglich, daß Reaktorexportländer die Uranversorgung für die von ihnen gelieferten Reaktoren teilweise oder ganz garantieren müssen. Dadurch würde ein zusätzlicher, indirekter Bedarf für solche Länder entstehen.

Auf diese Weise können die USA weiterhin Netto-Importland bleiben, obwohl ihr für 1985 geschätzter Anteil an der Produktionskapazität nach Tabelle 5.4 etwa dem geschätzten Anteil an der installierten Reaktorkapazität entspricht. Die USA haben gegenwärtig umfangreichere Import- als Exportverträge für Uran /ERDA (1976a)/.

Gegenwärtig sind die USA das Land mit den größten identifizierten Uranvorräten der westlichen Welt. Ein Grund dafür dürfte der hohe Explorationsgrad dieses Landes sein. Deshalb ist langfristig zu erwarten, daß bisher wenig prospektierte Länder ihren Anteil an den identifizierten Uranvorräten auf Kosten des USA-Anteils steigern können.

Kanada kann aufgrund seines relativ geringen Eigenbedarfs auch langfristig ein wichtiges Exportland für Uran bleiben. Es ist jedoch schwer abzusehen, ob und wie rasch sich die in der Vergangenheit restriktive Exportpolitik lockert.

Die Republik Südafrika und Niger werden bis 1985 die wichtigsten Uran-Lieferländer Afrikas bleiben. Südafrika hat bisher alle Uran-Lieferverträge erfüllt. Angesichts der politischen Situation ist die künftige Entwicklung aber schwer einzuschätzen.

In Australien ist die gegenwärtige Regierung den Empfehlungen des Fox-Reports gefolgt und hat die Aufnahme der Uranproduktion in kleinen Schritten im Norden des Landes (Ranger-Project) befürwortet. Die Aufnahme der Produktion ist jedoch politisch stark umstritten. Sie wird durch gewerkschaftlich gestützte Streiks behindert. Darüber hinaus hat die oppositionelle Labour Party für den Fall der Regierungsübernahme die Unterbindung der Uranproduktion angekündigt. Hier liegt ein Beispiel dafür vor, daß aus politischen Gründen weltweit mit einer geringeren Produktionskapazität gerechnet werden muß, als dem durch die Reserven gegebenen Potential entspricht.

Die für Westeuropa als möglicher Anteil an der Uran-Produktionskapazität angegebenen 6 % liegen deutlich höher als Westeuropas Anteil an den identifizierten wirtschaftlich gewinnbaren Uranvorräten (3 %). Etwa 300 000 t der westeuropäischen Uranvorräte der Kostenklasse zwischen 80 und 130 \$/Kg U liegen in Schweden. Ihr Abbau wird von der Schwedischen Regierung und weiten Teilen der Bevölkerung aus Gründen des Umwelt- und Landschaftsschutzes vorerst nicht akzeptiert. Dabei spielt die geringe Urankonzentration (300 ppm U) der hier zur Diskussion stehenden Schiefervorkommen eine Rolle; es wäre nötig, große Erzmengen zu fördern und zu verarbeiten.

Westeuropa gilt, wie auch die USA, als relativ gut prospektiert. Entsprechend werden die prognostischen Vorräte für Westeuropa mit 150 000 bis 200 000 t Uran gering angesetzt /BGR (1976)/. Innerhalb Westeuropas befinden sich die größten Vorräte⁺ der Kostenklasse \leq 80 \$/kg U in Frankreich (61 000 t U) und Spanien (15 000 t U). In der Kostenklasse zwischen 80 und 130 \$/kg U nimmt Schweden mit 300 000 t U (nach Angaben von /OECD (1977)/) deutlich den ersten Rang vor Frankreich (35 000 t U) ein.

⁺) Gesicherte plus geschätzte zusätzliche Vorräte

Anhang 1

Erläuterungen zur betrachteten Bandbreite der Primärenergienachfrage für die Bundesrepublik Deutschland

Vergleich der betrachteten Spanne bis 2000 mit Ergebnissen jüngerer Studien zur Primärenergienachfrage

Abb. A 1 zeigt einen Zeitausschnitt des Primärenergiebandes von Abb. 2.1 mit eingezeichneten Ergebnissen der in Tab. A1 aufgeführten Untersuchungen.

Für die deutlichen Abweichungen der Ergebnisse sind 2 Gründe mitbestimmend:

- a) Das gesamtwirtschaftliche Wachstum ist unterschiedlich (vgl. Tab. A 1). Es ist teilweise extern mit Varianten vorgegeben worden, /DIW, RWE, EWI (1978)/, teilweise Ergebnis von Modellrechnungen /ISP (1978)/ und teilweise als Arbeitshypothese zugrundegelegt worden /Referenzfall und Variante von /KFA (1977)/.
- b) Gezielt geförderte Energiesparmaßnahmen und wirtschaftsautonome Anpassungen an erhöhte Energiepreise wurden in schwer vergleichbarer Weise berücksichtigt; teilweise wurde zunächst bewußt auf eine Veranschlagung verzichtet.

Abb. A 1 zeigt, daß die in dieser Studie betrachtete Spanne für die Primärenergienachfrage bis 2000 etwa der Spanne der aufgeführten Untersuchungsergebnisse entspricht.

Tab. A 1

Daten zur Verknüpfung von
Wirtschaftswachstum und
Primärenergieverbrauch

		DIW, RWE, EWI (1978)		ISP (1978)				KFA (1977)	
		Untere Variante	Referenzfall	Referenzszenario		Wachstumsszenario		Referenzfall	höhere Variante
				ohne Sparmaßnahmen	mit Sparmaßnahmen	ohne Sparmaßnahmen	mit Sparmaßnahmen		
1975 - 1985	Mittlere Wachstumsrate der Gesamtwirtschaft R_W (%/a)	3,5	4,0	2,8	2,8	3,8	3,8	3,0	4,0
	Mittlere Wachstumsrate des Primärenergieverbrauchs R_E (%/a)	3,0	3,3	1,7	1,2	2,2	1,8	2,5	3,3
	Elastizitätskoeffizient R_E/R_W	0,86	0,83	0,60	0,44	0,58	0,47	0,83	0,83
	Wachstumsdifferenz $R_E - R_W$ (%/a)	-0,5	-0,7	-1,1	-1,6	-1,6	-2,0	-0,5	-0,7
1985 - 2000	Mittlere Wachstumsrate der Gesamtwirtschaft R_W (%/a)	3,0		2,0	2,0	2,7	2,7	2,0	3,0
	Mittlere Wachstumsrate des Primärenergieverbrauchs R_E (%/a)	1,5		1,9	1,0	2,3	1,6	1,8	2,5
	Elastizitätskoeffizient R_E/R_W	0,48		0,95	0,47	0,87	0,58	0,90	0,83
	Wachstumsdifferenz $R_E - R_W$ (%/a)	-1,5		-0,1	-1,0	-0,4	-1,1	-0,2	-0,5

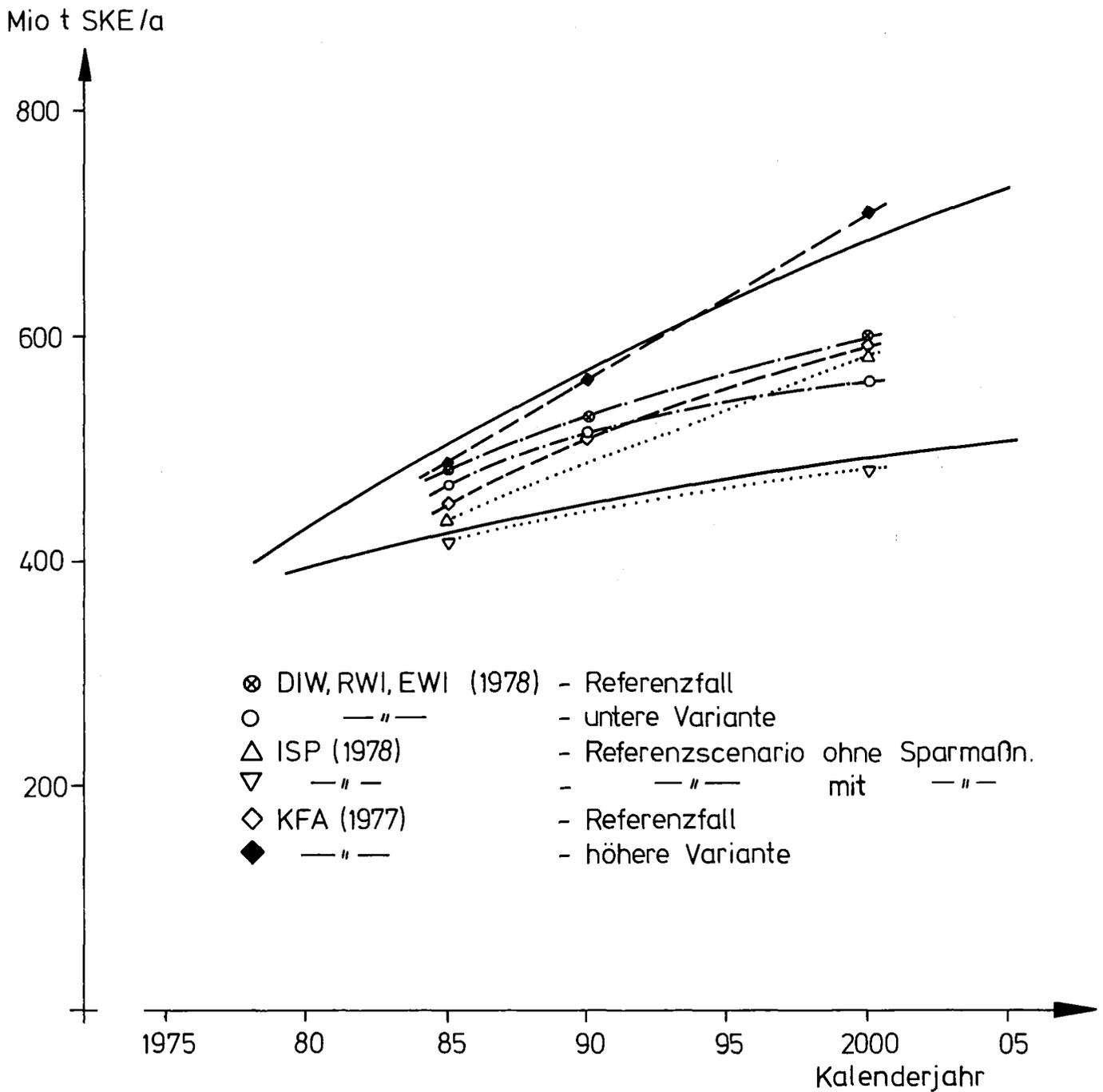


Abb. A.1 Primärenergienachfrage bis 2000

verschiedene Angaben und betrachtete Bandbreite
für die Bundesrepublik

Elastizitätskoeffizienten und Wachstumsdifferenzen zwischen Primärenergienachfrage und Bruttonsozialprodukt

Tab. A 1 enthält Angaben über Wachstumsraten der Primärenergienachfrage (R_E) und des inflationsbereinigten Bruttonsozialprodukts (R_W) sowie über Elastizitätskoeffizienten (R_E/R_W) und entsprechende Wachstumsdifferenzen ($R_E - R_W$), die sich aus den Ergebnissen der genannten Studien berechnen lassen.

Eine detaillierte Diskussion der erkennbaren und teilweise durch die oben genannten Gründe bedingten Abweichungen kann hier nicht vorgenommen werden. Die Tabelle weist nicht nur deutliche Abweichungen bei den Angaben für $R_E - R_W$ bzw. R_E/R_W für jeweils einen der aufgeführten Zeitbereiche aus, sondern auch uneinheitliche Trends der zeitlichen Entwicklung von $R_E - R_W$ bzw. R_E/R_W . In Abschnitt 2.1 wurde pauschal von $R_E - R_W = -1\% / a$ ausgegangen.

-
- +) Die Wachstumsdifferenz $R_E - R_W$ ist zugleich die relative zeitliche Änderungsrate der in Teil III der Studie diskutierten Energieintensität (Verhältnis zwischen gesamtem Primärenergieverbrauch E und Bruttonsozialprodukt W):

$$R_E - R_W = \frac{1}{E/W} \frac{d}{dt} (E/W)$$

Anhang 2

Modellannahmen über den Ausbau der Kernenergiekapazität

Modellparameter

Wenn etwa im Modell B eine asymptotische Kernenergiekapazität von ca. 200 GW_e angenommen wird, bedeutet das bei einer Nutzungsdauer der Kraftwerke von 25 Jahren, daß jährlich 8 GW_e außer Betrieb genommen und durch neue Anlagen ersetzt werden müssen.

1985 werden laut Modell B etwa 4 GW_e fertiggestellt. Die Frage nach dem weiteren Kapazitätswachstum nach 1985 läßt sich übersetzen in die Frage nach dem zeitlichen Übergang von einer jährlichen Erstellungsrate von 4 GW_e zu einer solchen von 8 GW_e.

Um zu quantitativen Angaben für die Übergangsphase zu gelangen, wird eine sehr einfache Modellannahme über das zeitliche Wachstum der jährlichen Erstellungskapazität E zugrundegelegt:

$$E = E_{as} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

Dabei ist E_{as} die langfristig (asymptotisch) erforderliche Erstellungsrate.

Bei einer Anlagenlebensdauer t_L ist der Zusammenhang zwischen der installierten Kapazität C und E gegeben durch:

$$\frac{dC}{dt} = E(t) - E(t - t_L) \quad (2)$$

Die resultierende analytische Form für $C(t)$ ist unterschiedlich für $t < t_L$ und $t > t_L$:

$$C(t) = C_{as} \left[\frac{t}{t_L} - \frac{1}{\alpha t_L} (1 - e^{-\alpha t}) \right] \quad t \leq t_L \quad (3a)$$

$$C(t) = C_{as} \left[1 - \frac{1}{\alpha t_L} (e^{-\alpha t_L} - 1) e^{-\alpha t} \right] \quad t \geq t_L \quad (3b)$$

E_{as} ist mit der asymptotischen Kapazität C_{as} durch t_L verknüpft:

$$E_{as} = C_{as} / t_L \quad (4)$$

Bei gegebener Lebensdauer t_L bestimmen also zwei Parameter den Zeitverlauf von C : Die asymptotisch erreichte Endkapazität C_{as} und die Zeitkonstante α .

Modellannahmen zur langfristig installierten Kernenergiekapazität C_{as}

Die wichtigsten Annahmen für die Modelle A, B und C wurden in Abschnitt 2.2 bei der kurzen Erläuterung durch Szenarien genannt.

Die den Modellen zugrundegelegten Zahlen für C_{as} sind:

Modell	A	:	304 GW_e
Modell	B	:	200 GW_e
Modell	C	:	108 GW_e

Diese Zahlen entsprechen Kombinationen von Einzelannahmen, die - soweit sie sich von Modell zu Modell unterscheiden - in Tab. A 2 zusammengestellt sind.

Die den Modellen A, B und C gemeinsam zugrundeliegenden Annahmen sind:

- a) Verhältnis zwischen Bruttostromerzeugung und Stromverbrauch als Endenergie = 6:5 (Annahme zur Berücksichtigung des Eigenverbrauchs im Stromversorgungssektor und der Verteilungsverluste, die etwa gegenwärtigen Verhältnissen entspricht)
- b) Bruttowirkungsgrad von Kernkraftwerken (SBR oder HTR) = 40 %
- c) Lastfaktor für Kernreaktoren = 70 %
- d) Verhältnis zwischen Primärenergieeinsatz für nichtelektrische Zwecke und nichtelektrischen Endenergieeinsatz = 7:5.

Es ist zu betonen, daß im Rahmen der Szenarien von Abschnitt 2.2 auch andere Kombinationen von Einzelannahmen mit den angegebenen Werten von C_{as} konsistent sind und daß die Abweichungen von runden Werten für C_{as} (300, 200, 100 GW_e) ohne besondere Bedeutung sind.

Modellannahmen für die Zeitkonstanten α

Die Zeitkonstanten für die Modelle A, B und C legen fest, wie rasch sich der Umfang des Kernenergieeinsatzes den Werten von C_{as} nähert. Sie wurden so gewählt, daß sich für 1985 folgende Daten für die installierte Kapazität von Kernkraftwerken ergeben:

Modell	A	:	33 GW_e
Modell	B	:	25 GW_e
Modell	C	:	18 GW_e

Tab. A 2

Modellannahmen für die langfristig installierte Kernenergiekapazität

		Modell A	Modell B	Modell C	Vergleichszahlen für 1976
Primärenergieeinsatz	(GW _{th})	1000	800	600	342
Primärenergieeinsatz	(Mio t SKE/a)	1080	863	647	369
Stromanteil am Endenergieverbrauch	(%)	35	27,5	20	13,5
Anteil der Kernenergie am Primärenergieeinsatz zur Stromerzeugung	(%)	75	70	60	13
Anteil der Kernenergie am übrigen Primärenergieeinsatz	(%)	28	23	16	0
Insgesamt installierte thermische Kernenergiekapazität	(GW _{th})	760	500	270	20
Äquivalente elektrische instal- lierte Kernenergiekapazität	(GW _e)	304	200	108	6,4

Historische Daten für Laufzeiten von Kernkraftwerksprojekten

Zu den markanten Zeitpunkten für Kernkraftwerksprojekte gehören die Auftragsvergabe, der Baubeginn und die Übergabe an den kommerziellen Betreiber. Die Zeitspannen zwischen diesen Zeitpunkten haben sich im Verlaufe der Zeit deutlich (teilweise aufgrund der Projektgröße) geändert. Abb. A 2 demonstriert historische Daten für die Zeitspanne zwischen Auftragsvergabe und Baubeginn und für die Zeitspanne zwischen Baubeginn und kommerziellem Betrieb für unterschiedliche Größenklassen von Kernkraftwerksprojekten. Wachsende Zeitspannen sind zu verzeichnen. Sie lassen eine Realisierung der Modelle A und B innerhalb der nächsten 10 Jahre als unwahrscheinlich erscheinen (vgl. Teil III der Studie).

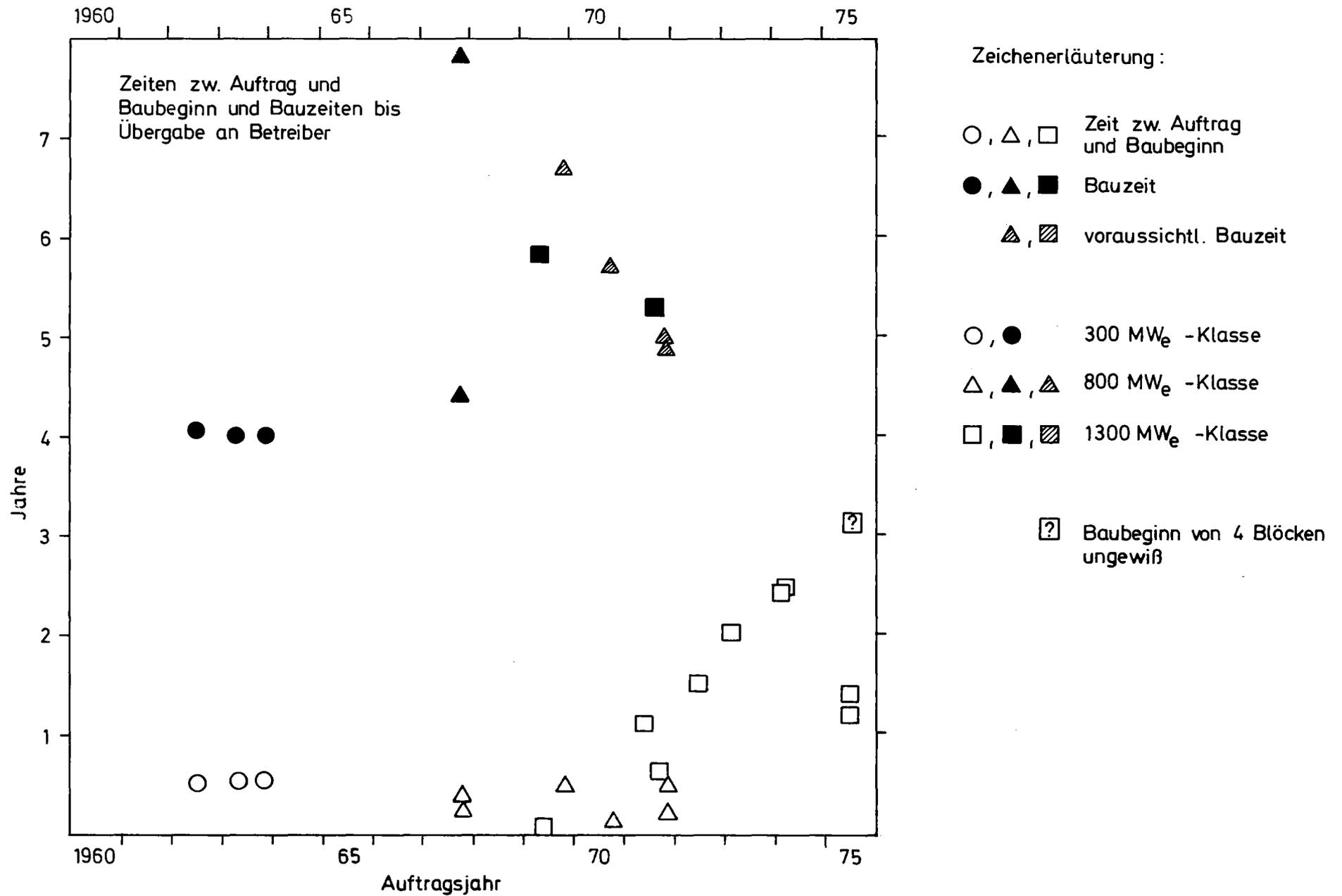


Abb. A2 Genehmigungs- und Bauzeiten für Kernkraftwerke, Bundesrepublik Deutschland

Anhang 3

Verwendete Reaktordaten

Daten für Leichtwasserreaktoren

Erstkern¹⁾

Uranbedarf ²⁾	(t/GW _e)	462
Trennarbeit ²⁾	(t UTA/GW _e)	256
Schwermetall	(t SM/GW _e)	100

Nachladungen³⁾

Natururan ⁴⁾	(t/GW _e ·a)	217
Uran-Äquivalent von U ₂₃₅ in entladene Brennstoff ⁵⁾	(t/GW _e ·a)	47
Plutonium-Produktion ⁶⁾	(t Pu/GW _e ·a)	0,205
Trennarbeit ⁴⁾	(t UTA/GW _e ·a)	139
Schwermetall-Nachladung	(t SM/GW _e ·a)	34

Anmerkungen:

- 1) GW_e brutto, d.h. mit Eigenverbrauch des Kraftwerks
- 2) Einschließlich 5 % Reserveelemente und 4 % Verluste (bei Urankonversion, Anreicherung und Fabrikation), 0,25 % tails assay
- 3) Bei Vollast, d.h. 8 760 h/a
- 4) Einschließlich 4 % Verluste (bei Urankonversion, Anreicherung und Fabrikation)
- 5) Nach Abzug von 1,5 % Verlusten bei Wiederaufarbeitung
- 6) Spaltbarer Anteil von Plutonium

Daten für Schnelle Brutreaktoren¹⁾

Erstkern

Spaltstoffinventar ²⁾	(t Pu/GW _e)	1,6 - 3,5
Zyklusinventar ²⁾	(t Pu/GW _e)	4 - 7

Nachladungen

Nachladung von U + Pu	(t SM/GW _e ·a)	20
Brutrate		1,1 - 1,4
Pu-Nettoproduktion ²⁾	(t Pu/GW _e ·a)	50 - 250 ³⁾

Anmerkungen:

- 1) Datenquellen: Meist /SCHRÖDER, R., WAGNER, J., (1975)/, /PAPP, R., (1977)/, /HÄFELE, W. et al. (1977)/.
- 2) Mit Pu ist hier spaltbares Plutonium gemeint
- 3) 250 mit Karbidbrütern erreichbar

Daten für ein Hochtemperaturreaktor-Nahebrütersystem¹⁾

		Vorbrüter (konv. HTR)	Nahebrüter
Erstkern			
Spaltstoffinventar	(t/GW _e)	1,38 ²⁾	2,90 ³⁾
Zyklusinventar, Spaltstoff	(t/GW _e)	2,31 ²⁾	4,24 ³⁾
Natururanbedarf	(t/GW _e)	505	-
Nachladungen			
mittl. Abbrand	(GW _{th} ·d/t SM)	23	24
SM-Nachladung	(t SM/GW _e ·a)	39,3	38
Anreicherung (Uran)	(%)	93	-
Natururanbedarf	(t/GW _e ·a)	205	-
Trennarbeit	(t UTA/GW _e ·a)	192	-
Konversionsrate		0,74	0,97
U-233-Nettoproduktion ⁴⁾	(t/GW _e ·a)	0,5 ⁵⁾	-

Anmerkungen:

- 1) Datenquellen: /SCHULTEN, u.a. (1977)/, /KOLB, G., (1977)/
- 2) U-235
- 3) Davon 9 % U-235, 91 % U-233
- 4) Nach Abzug von Rückführspaltstoff für den Vorbrüter
- 5) Davon 9 % U-235

Anhang 4

Zeitbetrachtungen zum externen SBR-Brennstoffkreislauf

Anfang der 90-er Jahre werden in der westlichen Welt nicht mehr als einige GW_e SBR-Kapazität (für Demonstrationszwecke) installiert sein, in der Bundesrepublik Deutschland vielleicht 1,5 GW_e . Die Demonstration der Wiederaufarbeitung und Refabrikation von Brüterbrennstoff wird sich also allein wegen relativ geringen Brennstoffanfalls auf einen deutlich geringeren Brennstoffdurchsatz beschränken müssen, als dies für LWR-Brennstoff z.B. mit der GWA⁺) möglich sein wird, die Anfang der 90-er Jahre in Betrieb gehen und den Brennstoff von etwa 40 GW_e LWR-Anlagen aufarbeiten soll.

In der Bundesrepublik Deutschland dürfte eine Demonstrationsanlage zur Wiederaufarbeitung von Brüterbrennstoff von einigen GW_e zumindest nicht früher fertig werden als die GWA. Von der Erstellung der GWA und von projektbegleitenden Entwicklungsarbeiten ist zu erwarten, daß die dabei gewonnenen Erfahrungen auf eine Demonstrationsanlage für Brüterbrennstoff übertragen werden können.

Ein erfolgreicher Betrieb der GWA könnte die Zuversicht erhöhen, daß man später die mit großen Mengendurchsätzen verknüpften Probleme auch für Brüterbrennstoff beherrschen wird. Auf diese Weise könnte die Kombination aus einer GWA und einer kleinen (z.B. ≈ 30 jato) Demonstrationsanlage zur Aufbereitung von Brüterbrennstoff eine hinreichende Informationsbasis für kommerzielle Auftragsentscheidungen für Schnelle Brutreaktoren zwischen 1995 und 2000 werden, die Voraussetzung für eine Brütereinführung um 2005 sind.

+) GWA: Große Wiederaufarbeitungs-Anlage (1400 jato, von der Deutschen Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen projektiert).

Für die Fabrikation von Brüterbrennstoff dürfte die Zeit bis zu einer entsprechenden Demonstration ähnlich knapp bemessen sein wie für die Wiederaufarbeitung.

Der weltweite Einführungszeitpunkt wird durch die Industrieländer bestimmt, für die im Falle des Schnellen Brutreaktors die Verhältnisse in der Bundesrepublik vielleicht typisch für Länder ohne Kernwaffen sind.

In den USA sind die erklärten Zielsetzungen im Bereich der Kernenergie gegenwärtig nicht darauf angelegt, die Demonstration einer ausreichend großtechnischen Kreislaufführung für Brüterbrennstoff möglichst rasch zu erreichen. In Westeuropa sind Frankreich und England verfahrenstechnisch weiter fortgeschritten als die Bundesrepublik. Baureife Unterlagen für industrielle Demonstrationsanlagen liegen auch aus diesen Ländern nicht vor.

Anhang 5

Abzuklärende verfahrenstechnische Fragen beim externen SBR-Brennstoffkreislauf

Zu den abzuklärenden verfahrenstechnischen Fragen im Bereich Wiederaufarbeitung und Fabrikation von Brennelementen mit Rückfuhrbrennstoff sind beispielsweise für SBR zu nennen /SCHMIEDEL, P., STOLL, W. (1976)/:

- Abklärung der Verfahrenstechnik zur Auflösung Pu-reichen Brennstoffs in der Eingangsstufe der Wiederaufarbeitung;
- Anpassung der Anlagenteile der Wiederaufarbeitung an den im Vergleich zum LWR-Brennstoff höheren Spaltstoffgehalt von Brüterbrennstoff und an höhere spezifische Radioaktivität;
- Verfahrensentwicklung zur Erzielung homogener Mischkristalle aus UO_2 und PuO_2 bei der Pellet-Herstellung, um unvollständige Pu-Auflösung in der Eingangsstufe der Wiederaufarbeitung zu vermeiden;
- Verfahrensentwicklung zur Vermeidung unerwünschter und nachträglich schwer beseitigbarer Einlagerungen von Radiolyse-Produkten in die Pellets nach der Herstellung;
- Verfahrensentwicklung zur Vermeidung untolerierbarer Strahlenbelastung bei der Brennelementherstellung des n- und γ -aktiven Rückfuhr-Brennstoffs durch hinreichend abgeschirmte, fernbediente und automatisierte Prozeßführung bei Gewährleistung rascher Reparaturfähigkeit kontaminierter Anlagenteile.

Mit der erforderlichen Auslegung der Verfahrensschritte auf große Mengendurchsätze ergeben sich verschiedene 'scale-up'-Probleme, für deren Lösung weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich sind und die teilweise auf die Verfahrensauswahl rückwirken können.

Literaturverzeichnis zu Teil I

BATTELLE, COLUMBUS LAB.

Study of Advanced Fission Power Reactor Development for the United States (Vol. I)
Columbus/Ohio, June 1976, BCL-NSF-C946-2

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

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)

Stellungnahme zur Beurteilung der innerdeutschen Uranvorkommen
in Hinsicht auf den Uranbedarf bis 1986
Hannover, Januar 1978

BRAUN, R., u.a.

Zum Wirtschaftlichkeitsvergleich von Uran-Anreicherungsverfahren
atw XIX/11, Nov. 1974, S. 536

DEGENS, E.T., et al

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

DIW, EWI, RWI (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung,
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln,
Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung)

Die künftige Entwicklung der Energienachfrage in der Bundes-
republik Deutschland und deren Deckung
- Perspektiven bis zum Jahre 2000 -
Essen 1977

ERDA

Uranium Industry Seminar
ERDA, GJO-108 (76)
Grand Junction, Colorado, USA, Oct. 1976 (1976a)

ERDA

National Uranium Resource Evaluation, Preliminary Report
ERDA, GJO-111 (76)
Grand Junction, Colorado, USA, June 1976 (1976b)

ERDTMANN, G.

Bestimmung von Uran und Thorium in Kohleaschen und Kraftwerk-
Filteraschen sowie in Bauxit und Rotschlamm durch Aktivierungs-
analyse mit epithermischen Neutronen
Kerntechnik, 18(1976)1, S. 36-40

ERZMETALL

Uran
Erzmetall, 30(1977)9, S. 425

FINCH, W.I., et al.

Discussion of Uranium Availability and the Breeder Decision
Energy Systems and Policy, 1(1975)3, S. 259-269

HABASHI, F.

Uranium in Phosphate Rock
Spec. Publ. 52, Montana College of Mineral Science and Technology
Butte, Montana, Dec. 1970

HAFELE, W., et al.

Fusion and Fast Breeder Reactors
IIASA, Laxenburg, Nov. 1977 (RR-77-8)

HAMESTER, H.L., et al.

Risk Aversion and Energy Policy: A Case for Breeder Research
and Development
Energy Systems and Policy, 1(1975)3, S. 233-258

ISP (Institut für Angewandte Systemforschung und Prognose)

Das Deutschland-Modell/Herausforderungen auf dem Weg ins
21. Jahrhundert (Hrsg. E. Pestel)
Stuttgart 1978

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

KFA (Kernforschungsanlage Jülich)

Angewandte Systemanalyse Nr. 1: "Die Entwicklungsmöglichkeiten der
Energiewirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland - Unter-
suchung mit Hilfe eines dynamischen Simulationsmodells (Band I)
Jül-Spez-1/Bd. 1, November 1977

KOLB, G.

Pers. Mitteilung
KFA-Jülich 1977

LANE, J.A., et al.

Nuclear Power in Developing Countries
Int. Conference on Nuclear Power and its Fuel Cycle
Salzburg, May 1977, IAEA-CN-36/500, Wien 1977

LLEWELYN, G.I.W.

Recovery of Uranium from Sea-Water
Uranium Ore Processing, Proceedings of an Advisory Group
Meeting, Washington, Nov. 1975
IAEA, Dec. 1976, S. 205-212

MICHEL, H., SCHNEIDER, H.-J.

Uranvorkommen im Zusammenhang mit den tertiären Vulkaniten des
lateinamerikanischen Kordillerenzuges
Erzmetall, 31(1978)1, S. 1-8

MIIDA, J., et al.

Nuclear Power Programmes and Medium Term Projections in the
OECD Area
Int. Conference on Nuclear Power and its Fuel Cycle
Salzburg, May 1977, IAEA-CN-36/492, Wien 1977

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, MITTELSTAND UND VERKEHR DES
LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.)

Bewertung der Kernenergie - Ausgewählte Referate
eines Arbeitskreises
Stuttgart, Juli 1977

MÜLLER, W., STOY, B.

Entkopplung - Wirtschaftswachstum ohne mehr Energie?
Stuttgart 1978

NEU, A.D.

Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch -
eine Strategie der Energiepolitik?
Institut für Weltwirtschaft, Kiel, Februar 1978
(Kieler Diskussionsbeiträge Nr. 52)

NUCLEAR NEWS

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

OECD

Uranium - Resources, Production and Demand -
Paris, December 1975

OECD

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

PAPP, R.

Brennstoffmengen, Aktivitätsinventare und radioaktive Freisetzung
bei der Energieerzeugung auf der Basis von Leichtwasserreaktoren
und Schnellen Natrium-Brütern
Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-2453 (1977)

SCHMIEDEL, P., STOLL, W.

Rückführung von Uran und Plutonium
DAtF-Symp.: Entsorgung der Kerntechnik
Mainz, Januar 1976

SCHRÖDER, R., WAGNER, J.

Überlegungen zur Einführung Schneller Brutreaktoren im DeBeNe-
Lux-Bereich
Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-Ext. 25/75-1 (Juni 1975)

SCHULTEN, R., u.a.

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

VENZLAFF, H.

Arme Uranerze als mögliche Rohstoffquelle
atw XXI/3, August 1976, S. 398-401

WAES

Energy: Global Prospects 1985-2000
Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies
New York/St. Louis/San Francisco 1977

WORLD ENERGY CONFERENCE

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