

KFK-366

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

September 1965

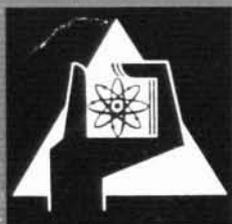
KFK 366

Institut für Angewandte Reaktorphysik

KERNBRENNSTOFFBEDARF UND KOSTEN VERSCHIEDENER REAKTOR-  
TYPEN IN DEUTSCHLAND

DEMAND FOR NUCLEAR FUELS AND COSTS OF DIFFERENT REACTOR  
TYPES IN GERMANY

H.Grümm, D.Gupta, W.Häfele, P.Jansen, E.Schmidt, J.Seetzen



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



DEUTSCHES ATOMFORUM E. V.  
und  
KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

September 1965

KFK 366

Studienkreis Kernenergieserven  
am Institut für Angewandte Reaktorphysik  
des Kernforschungszentrums Karlsruhe

KERNBRENNSTOFFBEDARF UND KOSTEN VERSCHIEDENER  
REAKTORTYPEN IN DEUTSCHLAND<sup>†)</sup>

H. Grumm<sup>1)</sup>, D. Gupta<sup>2)</sup>, W. Häfele<sup>5)</sup>, P. Jansen<sup>5)</sup>, E. Schmidt<sup>5)</sup>, J. Seetzen<sup>5)</sup>

unter Mitarbeit von

D. Faude<sup>5)</sup>, W. Gmelin<sup>5)</sup>, K. Krewer<sup>3)</sup>, W. Schmidt<sup>4)</sup>

†) In der hier vorliegenden Form ausgearbeitet für den II. FORATOM-Kongreß auf Anregung des Rapporteurs Prof. Dr. K. Wirtz als Ergänzung des nationalen Berichts zu Sektion IV "Die künftige Nutzung der Atomenergie in Europa".

- 
- 1) NUKEM GmbH., Wolfgang
  - 2) Institut für Kernverfahrenstechnik, GfK
  - 3) Institut für Reaktorentwicklung, GfK
  - 4) Technische Abteilung, GfK
  - 5) Institut für Angewandte Reaktorphysik, GfK

Gesellschaft für Kernforschung m. b. H., Karlsruhe

Am Studienkreis Kernenergieserven haben sich folgende Firmen und Institutionen beteiligt:

Firma AEG	BMwF
" BBC-Krupp	GKSS Geesthacht
" GHH	KFA Jülich
" INTERATOM	KFZ Karlsruhe
" NUKEM	TH Aachen
" RWE	
" SSW	

Der Studienkreis Kernenergieserven wurde im Herbst 1964 gebildet, um diese Studie zu fördern und die behandelten Fragen zu diskutieren. Eine ausführlichere Veröffentlichung der Voraussetzungen und Ergebnisse folgt gegen Ende 1965.

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung und Fragestellung	1
2. Methodik der Studie	4
2.1 Allgemeines zur Methodik	4
2.2 Nuklearer Energiebedarf in Deutschland	8
2.3 Kernbrennstoffe - Bedarf und Erzeugung	11
2.4 Kostenermittlung	13
3. Zur Frage der Kernbrennstoffreserven	15
3.1 Vorbemerkungen	15
3.2 Weltvorräte an Uranerzen	16
3.3 Plutoniumpreise	18
3.4 Preisentwicklung für Abfalluran, Thorium und U-233	18
4. Erläuterungen zu den Reaktordaten	19
5. Erläuterungen zu den Eintypen-Strategien	23
Ergebnisse der Eintypen-Strategien	24
6. Erläuterungen zu den Zweitypen-Strategien	32
Ergebnisse der Zweitypen-Strategien	33
7. Erläuterungen zu den zusammenfassenden Darstellungen	45
Zusammenfassende Darstellungen	46
8. Diskussion der Ergebnisse	53
9. Kurzgefaßte Schlußfolgerungen	62
Literatur	65

C o r r i g e n d u m

1. Auf Seite 14 heißt die Gleichung (7) richtig:

$$k_{Br} = \frac{R \cdot \sigma_R}{E_1 \cdot \left[ 1 - \left( 1 + \frac{R}{100} \right)^{-L} \right]} \left\{ \sigma \cdot \left[ k_o^* - k_l^* \left( 1 + \frac{R}{100} \right)^{-L} \right] + \frac{k_o^* - k_l^*}{Z} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{R}{100} \right)^{-\sigma_B} - \left( 1 + \frac{R}{100} \right)^{-L}}{1 - \left( 1 + \frac{R}{100} \right)^{-\sigma_{R/Z}}} \right\}$$

2. Auf Seite 16 muß es heißen:

Tabelle 2

Stoff	II optimistisch 1970 - 2040	I pessimistisch		
		1970-85	1985-2000	2000-2040
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (\$/lb)	8	8	20	30
ThO <sub>2</sub> (\$/lb)	8	8	20	30
Pu (\$/g spaltb.)	10	10	27,5	27,5

3. Bei Tabelle 5, Seite 22, Reaktor-Kostendaten, sind folgende Werte richtigzustellen:

Spez. Investitionskosten  $k_I$  (Dpf/kWh):

D <sub>2</sub> O (SSW)			AGR (UKAEA)		
a	b	c	a	b	c
1.393	1.393	1.393	1.163	1.163	1.163

4. Auf Seite 23, 4. Zeile von oben, muß es heißen:

Die Abbildungen auf den Seiten "24 bis 31"

5. Auf Seite 55, 5. Zeile von oben, muß es heißen:

"der chemischen Wiederaufarbeitung"

## 1. Einleitung und Fragestellung

Schon in der Pionierzeit der Kernenergieentwicklung wurde sehr ernsthaft die Frage nach den Uranvorräten, d.h. nach den Kernenergieereserven gestellt. Insbesondere war es W.H. ZINN, der in den Jahren 1945 bis 1950 diese Frage aufwarf und daraufhin die Entwicklung von schnellen Brutreaktoren einleitete. Allerdings hatte man damals die Größe der Uranvorräte erheblich unterschätzt [1] und dementsprechend bei der ersten Generation von schnellen Brütern (EBR-I, EBR-II, Dounreay Fast Reactor) fast ausschließlich eine hohe Brutrate in den Mittelpunkt der Überlegungen gestellt. Ähnlich hatte A. WEINBERG die Entwicklung eines thermischen Brütters betrieben.

In der darauffolgenden Zeit von 1958 bis 1961 überlagerten sich drei Entwicklungen. Einerseits war deutlich geworden, daß die optimistischen Erwartungen, wie sie etwa auf der 1. Genfer Konferenz an die Entwicklung der Kernenergie geknüpft worden waren, sich nicht so schnell erfüllen würden. Zum anderen hatte sich inzwischen herausgestellt, daß es nicht unerhebliche billige Natururanreserven gibt. Aus beiden Gründen konnte es nicht rasch zu einer Krisensituation bei der Versorgung mit Uran kommen. Schließlich war ganz deutlich geworden, daß Reaktoren wirtschaftlich arbeiten und gegenüber fossilen Kraftwerken konkurrenzfähig sein müssen, wenn es zu einem Durchbruch der Kernenergieentwicklung kommen sollte.

Diese Erkenntnisse lenkten die Aufmerksamkeit der Gruppen, die Reaktoren entwickelten, u.a. auch auf den geschlossenen Plutonium-Brennstoffkreislauf bei schnellen Brutreaktoren. Es kam zur Konzipierung schneller Brüter mit großen Cores ( $\approx 5000$  l), die nichtmetallische Brennelemente verwenden, d.h. zur zweiten Generation von schnellen Brutreaktoren, bei der die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund steht, auch wenn das auf Kosten der Brutrate geht. Auf dem Gebiet des thermischen Brütters führte das in ähnlicher Weise dazu, daß neben echten thermischen Brütern nun auch hochkonvertierende Reaktoren, z.B.  $D_2O$ -Reaktoren mit Natururan in den Vordergrund traten. Die Situation dieser Jahre drückt sich am besten in dem bekannten Aufsatzdialog von K. ERGEN und E.L. ZEBROSKI aus: "Breeding - how soon a necessity?" [2].

Im Verfolg dieses Ansatzes trat neben die Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeit und des Brütens nun auch noch der Gesichtspunkt der sinnvollen

Verwendung von Plutonium, das in thermischen Reaktoren, z.B. in Leichtwasserreaktoren, anfällt. Bekanntlich ist der Reaktivitätswert von Plutonium mit hohen Anteilen an Pu-240 in schnellen Reaktoren mindestens 1,4 mal höher als in thermischen Reaktoren<sup>6)</sup>.

1962 brachte dann der "Report to the President" [4] insofern eine Wende, als er durch einen zusammenfassenden Überblick über die energiepolitische Gesamtsituation die rechten Proportionen zwischen Wirtschaftlichkeit des Reaktorbetriebes und sinnvoller Nutzung der Natururan- und Thorium-Vorräte herstellte. 1963 wurde diese Betrachtungsweise durch den Artikel von J. DIETRICH "Efficient Utilization of Nuclear Fuels" [5] vertieft.<sup>7)</sup> Das führte dann dazu, daß sich fast wie von selbst die auch heute noch gelegentlich als offen empfundene Frage nach der "Zwischengeneration" der hochkonvertierenden Reaktoren stellte. Noch in das Jahr 1963 fiel auch der Auftrag über das Oyster-Creek-Kernkraftwerk, der an die General Electric ging. Dieser Auftrag stellte in den Augen vieler Beobachter den Durchbruch der Kernkraftwerke zur eigentlichen Wirtschaftlichkeit dar. Umsomehr mußte nun die Frage nach den Uran- und Thorium-Vorräten ernstgenommen werden. So überrascht es nicht, daß diese Frage in einer Reihe von Studien erneut aufgegriffen wurde. Hier sind z.B. die Arbeiten von R. GIBRAT [6], D. RITTER und G. BLÄSSER [7], J.J. WENT [8] und vor allem die kürzlich erschienene EURATOM-STUDIE [9] zu nennen.

Es zeigte sich, daß es vom Gesichtspunkt der Kernenergieserven her möglich ist, auch etwas allgemeiner gestellte Fragen zu beantworten. Insbesondere gilt dies für das Wechselspiel von bestimmten Reaktortypen. Das aber wiederum bedeutet, daß neben den in Rede stehenden Uran- und Thorium-Vorräten nun auch Kosten betrachtet werden müssen. Planspiele unter Verwendung von Vorräten, Kosten und Reaktoreigenschaften können auf den verschiedensten logischen Stufen durchgeführt werden. Im zweiten Abschnitt des Berichtes wird auf diesen Punkt ausführlicher eingegangen. Hier soll nur festgehalten werden,

---

<sup>6)</sup> Siehe z.B. auch E.A. ESCHBACH [3]. Dort ergibt sich als Reaktivitätsäquivalent der Faktor 0,8, wenn man Plutonium mit U-235 in thermischen Reaktoren vergleicht. Eigene Überlegungen haben gezeigt, daß in schnellen Reaktoren Plutonium mit hohen Anteilen an Pu-240 gegenüber U-235 den Kritikalitätswert 1,5 hat, so daß sich streng genommen sogar der Äquivalenzfaktor von  $1,5/0,8 \approx 1,9$  ergibt.

<sup>7)</sup> Allerdings wurden hier recht pessimistische Annahmen über die Entwicklung von schnellen Brütern der zweiten Generation gemacht.

daß die vorgelegte Studie dem "wenn-dann"-Schema folgt. Es ist also noch nicht zu einer Rückkopplung der Annahmen an die Ergebnisse gekommen. Dies ist für eine künftige Studie vorgesehen. Immerhin lassen sich durch die hier vorgenommene Variation der Eingangsparameter auch schon eine Reihe wichtiger Schlußfolgerungen gewinnen.

Zu diesen Schlußfolgerungen gehört u.a. auch die Angabe von anzustrebenden Reaktoreigenschaften. Durch Studium der für eine Reaktorentwicklung gegebenen Randbedingungen (der Umwelt) kann deutlich gemacht werden, worauf diese Entwicklung zu zielen hat. Je mehr Entwicklungszeit ein Reaktortyp erfordert, desto weniger selbstverständlich ist die genaue Zielsetzung für diese langfristige Entwicklung. Vielmehr muß die Zielsetzung durch vorausschauende Studien der im Zeitpunkt der Fertigstellung des Reaktorprojektes zu erwartenden Randbedingungen erst ermittelt werden. Dieser Sachverhalt kann an der Frage der Brutrate deutlich gemacht werden. Es scheint so zu sein, daß bei schnellen Brütern ein Abwägen zwischen Brüten und Wirtschaftlichkeit stattfinden muß. Dauert aber die Entwicklung eines 1000 MWe Brutkraftwerkes 15 bis 20 Jahre (z.B. von 1960 bis 1980), so muß das für 1980 erstrebenswerte Verhältnis von Brüten und Wirtschaftlichkeit in etwa schon 1965 bekannt sein. Dieser Punkt gehört ebenfalls zu den ursprünglichen Fragestellungen der Studie.

Auch im deutschen Bereich ist es durch den Auftrag für die Kernkraftwerke Gundremmingen, Obrigheim und Lingen zu einem allerdings weniger drastischen Durchbruch der Kernenergie gekommen, und es werden in Deutschland langfristige Brutreaktor-Projekte bearbeitet: Das Kernforschungszentrum Karlsruhe verfolgt seit 1960 das Karlsruher Projekt Schneller Brüter, während die Kernforschungsanlage Jülich sich seit einiger Zeit der Entwicklung eines thermischen Brutreaktors widmet. Somit gab es genügend Veranlassung, im deutschen Rahmen eine möglichst umfassende Studie auszuarbeiten. In diesem Sinne wurde die vorliegende Studie zwar am Institut für Angewandte Reaktorphysik des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt, jedoch wurde sie vom Studienkreis Kernenergieserven getragen, an dem sich im wesentlichen alle interessierten deutschen Stellen beteiligten, so daß die hier vorgelegten Ergebnisse etwas allgemeinere Bedeutung haben.

## 2. Methodik der Studie

### 2.1 Allgemeines zur Methodik

Sollen Fragen der Kernenergieserven in Form von Natururan- und Thorium-Vorräten mit Fragen der Reaktorentwicklung in Verbindung gebracht werden, so ist das nur mit Hilfe einer Kostenstudie möglich. Hat man alle erforderlichen Eingangsdaten in der Hand, so kann man aus den Reaktordaten und für ein zunächst angenommenes Preisniveau für Uran- bzw. Thoriumerze die Kosten für nuklear erzeugte elektrische Energie ermitteln. Im Wechselspiel mit der Erzeugung von elektrischer Energie in herkömmlichen Kraftwerken bedingt das einen nach Ort und Zeit veränderlichen Marktanteil der nuklearen Energieerzeugung, der dann selbst wieder auf die Nutzung und damit auf den Preis der Natururan- und Thorium-Vorräte rückwirkt. Bei der Planung des Neubaus von Kraftwerken, ob sie nun nuklear oder fossil sind, wird ähnlich vorgegangen, wenn nicht längere Zeiträume als etwa 5 Jahre zur Diskussion stehen. Derartige Verfahren sind im Englischen auch als "power casting" bekannt [10].

Die hier vorliegende Studie hat sich zum Ziel gesetzt, den Zeitraum bis zum Jahre 2040 zu betrachten. Dabei zeigt es sich sehr schnell, daß es nicht möglich ist, alle für das oben beschriebene Wechselspiel erforderlichen Eingangsdaten bereitzustellen. Dies gilt umsomehr, als die Entwicklung von Kernreaktoren noch voll im Fluß ist und der zur Diskussion stehende Bedarf an nuklearer Energie nicht nur eine Rückwirkung auf den Preis des Uran- und des Thoriumerzes haben wird, sondern ebenso die Entwicklung der Reaktoren selbst beeinflussen wird.

Ohne das Ziel einer Beschreibung des oben angegebenen Wechselspiels aus den Augen zu verlieren, war es zunächst erforderlich, sich auf ein weniger anspruchsvolles, aber heute durchführbares Planspiel zu beschränken. Dabei wird eine vernünftig erscheinende Schätzung des Bedarfs an nuklearer Energie an den Anfang der Überlegungen gestellt. Um möglichst sorgfältig vorzugehen, wurde diese Bedarfsschätzung in sehr enger Wechselwirkung mit dem Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk (RWE) durch M. RECKER von der Studiengruppe der TH Aachen, die Professor H. MANDEL untersteht, vorgenommen (vgl. Abschnitt 2.2).

Weiterhin wurde große Sorgfalt auf die Auswahl von charakteristischen Reaktordaten gelegt (vgl. Abschnitt 4). Es erschien sinnvoll, allein 1000 MWe-Einheiten zu vergleichen, weil solche Einheiten nach 1970 zum Einsatz kommen dürften. Andererseits mußten die Reaktordaten auf das Jahr 1970 bezogen werden, weil nur im Sinne einer zeitlichen Normierung vernünftige Vorhersagen möglich erscheinen. Die zeitliche Normierung bedingt natürlich, daß manche Reaktortypen bis dahin schon sauber erprobt sein werden, während andere sich noch im Stadium der Planung bzw. des Baues des Prototyps befinden werden.

Unter den ausgewählten Reaktortypen befindet sich naturgemäß der Leichtwasserreaktor (LWR). Hier wurde einerseits der uns von der Reaktorentwicklungsgruppe der Siemens-Schuckertwerke (SSW) übermittelte Datenblock für einen Druckwasserreaktor berücksichtigt, zum anderen wurde ein Datenblock eines Druckwasserreaktors verwendet, wie er in einer ORNL-Studie [11] angegeben wurde. Beidesmal handelt es sich um Druckwasserreaktoren, so daß ganz deutlich abgelesen werden kann, in wie hohem Maße die Reaktor-Eingangsdaten bei ein und demselben Typ zu erheblich unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Es ist indessen wichtig, darauf hinzuweisen, daß die Vorstellungen der AEG über einen Leichtwasser-Siedereaktor - mutatis mutandis - sich sehr weitgehend mit den Werten des LWR-ORNL-Reaktors decken.

Weiter wurde ein Gas-Graphit (Mgnox)-Reaktor (GG), wie er von französischer Seite (CEA) vertreten wird [12], in die Liste der zu behandelnden Reaktoren aufgenommen. Hier ist darauf hinzuweisen, daß sich die von uns sinngemäß ermittelten Kostendaten optimistisch von den englischen Daten abheben. Es ist nicht der Zweck dieser Studie zu prüfen, welche Datenblocks am realistischsten sind. Vielmehr war es wichtig, die Ergebnisse dieser Studie mit französischen Ergebnissen vergleichen zu können.

Ein D<sub>2</sub>O-Reaktor mit Natururan (D<sub>2</sub>O) wird durch die Arbeiten der Siemens-Schuckertwerke nahegelegt. Von dieser Seite ist auch der Datenblock bereitgestellt worden. Dieser Reaktortyp dürfte auch sehr weitgehend für die insbesondere von W. LEWIS vertretene kanadische Entwicklungslinie typisch sein, so daß die vorliegenden Ergebnisse für die schon seit langem

andauernde Diskussion über  $D_2O$ -Natururanreaktoren und schnelle Brüter hilfreich sein dürften.

Nachdem sich vor kurzem England entschieden hat, der eigenen Advanced Gas-cooled Reactor (AGR)-Linie gegenüber Leichtwasserreaktoren amerikanischer Bauart den Vorzug zu geben, war es interessant, auch diesen Reaktortyp aufzunehmen. Die AGR-Daten wurden freundlicherweise von der UKAEA über die Firma Nukleardienst zur Verfügung gestellt.

Der Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR) entspricht den in der oben zitierten ORNL-Studie [11] angegebenen Daten; es handelt sich um Reaktordaten, die von General Atomics (GA) vertreten werden. Diese Daten entsprechen auch sehr weitgehend den von BBC-Krupp und der Kernforschungsanlage Jülich vertretenen Vorstellungen.

Es folgen Natriumgekühlte-Schnelle Brüter (Na-BR). Die General Electric (GE) hat 1964 eine umfassende Studie eines solchen Reaktors veröffentlicht [13]. Das Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK) hat im Jahre 1964 die Studie Na-1 publiziert [14]. Vielleicht der wichtigste Unterschied dieser beiden Brüterstudien liegt in der Höhe der Brutrate. Um zu einer Aussage über die sinnvollerweise anzustrebende Brutrate zu kommen, war es vernünftig, eben diese zwei Schnellbrüter in die Studie aufzunehmen.

Es sei noch einmal ausdrücklich betont, daß der Studienkreis Kernenergie-reserven zwar die Konsistenz aller Reaktordaten in sich und mit anderen bestehenden Angaben geprüft, aber es nicht als seine Aufgabe betrachtet hat, Wertungen und Wichtungen dieser Reaktoren und vor allem der Kostendaten vorzunehmen.

Bei Vorgabe des nuklearen Energiebedarfs und der (hier als zeitlich unveränderlich angenommenen, d.h. konservativen) Reaktor- und Kostendaten ist es möglich, den Bedarf an Thorium- und Uranvorräten sowie die Energieerzeugungskosten zu ermitteln. Dies wurde in Form von Ein- und Zweitypenstrategien getan.

Bei den Eintypenstrategien (vgl. Abschnitt 5) wurde von der Annahme ausgegangen, daß nur ein einziger Reaktortyp zum Tragen kommt. Bei der

Eintypenstrategie mit GE- bzw. KFK-Brütern führt das allerdings zu einer unrealen Anfangssituation, da Plutonium nicht in der Natur zur Verfügung steht. Diese logische Lücke kann bei der Zweitypenstrategie geschlossen werden (vgl. Abschnitt 6). Dort wird angenommen, daß ein Brutreaktor dann und nur dann gebaut wird, wenn innerhalb der Grenzen dieser Strategien - d.h. ohne Zukauf von außen - genügend Plutonium zur Verfügung steht. Damit ist eine Bindung zwischen dem Bau von Konvertern und dem Bau von Brutreaktoren hergestellt. Etwa zu dem Zeitpunkt, wo die Populations-Verdopplungszeit der schnellen Brutreaktoren mit der zeitlich größer werdenden Verdopplungszeit des nuklearen Energiebedarfs übereinstimmt, werden also nur noch Brüter zugebaut. Die Konverterreaktoren sterben danach zufolge ihrer endlichen Lebensdauer aus.

Bei der Kostenermittlung wurden neben den jährlichen Energieerzeugungskosten auch die kumulativen Kosten bis zum Jahre 2000 ermittelt. Diese Kosten wurden als Barwerte bei 7 % Diskontsatz, bezogen auf das Jahr 1970, berechnet (vgl. Abschnitt 7). Dieses Vorgehen erlaubt es z.B., die für das Jahr 1970 angesetzten Entwicklungskosten mit dem gesamten Kostenpotential bis zum Jahre 2000 zu vergleichen.

Bei einigen Eingangsparametern wurden gewisse Variationen vorgenommen. Das gilt insbesondere für die Preisentwicklung der Uran- und Thoriumerze (vgl. Abschnitt 3). Ebenso wurde eine obere und untere Bedarfsschätzung für nukleare Energie berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.2). Die verschiedenen Reaktortypen stellen in sich eine Variation der Reaktorparameter dar, insbesondere die Paare: LWR (SSW) und LWR (ORNL) bzw. Na-BR (GE) und Na-1-BR(KFK). Damit wird es möglich, Schlußfolgerungen abzuschätzen, die eigentlich erst bei dem eingangs beschriebenen Planspiel der vollen Wechselwirkung zwischen fossilen Brennstoffpreisen, Uranpreisen, Kraftwerksdaten, Energiepreisen und Bedarf an nuklearer Energie möglich werden. Es soll hier noch einmal hervorgehoben werden, daß die vorgelegte Studie dem "wenn-dann"-Schema folgt, : wenn der und der Bedarf an nuklearer Energie, die und die Uran-Kosten und bestimmte Reaktordaten vorliegen, dann kommt es zu den und den Kosten und zu einem bestimmten Bedarf an Uran- bzw. Thoriumerzen.

Im folgenden soll etwas näher auf die verwendeten Rechenmethoden und Daten eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten mathematischen Modelle und vor allem die Belegung des sehr umfangreichen Datenmaterials (für 20 Reaktoren jeweils etwa 50 Zahlenwerte) konnte aus Raumgründen nicht in diese zusammenfassende Darstellung aufgenommen werden. Sie wird, wie erwähnt, in einer ins Detail gehenden Veröffentlichung [15] nachgetragen.

## 2.2 Nuklearer Energiebedarf in Deutschland

Wie bereits bemerkt wurde, hat M. RECKER [16] die dieser Studie zugrunde liegenden Bedarfsprognosen ausgearbeitet. Zunächst wurde der zu erwartende Gesamtbedarf an Elektroenergie abgeschätzt. Ausgangspunkt waren die einschlägigen bis 1975 reichenden Prognosen [17] für die EWG-Länder. Die Extrapolation bis zum Jahre 2040 benutzte amerikanische Schätzungen [18] als Leitlinie und ging von folgenden Annahmen aus: Verdopplung der Bevölkerungszahl bis zum Jahre 2040, Anwachsen des jährlichen Verbrauchs pro Kopf auf 40.000 kWh, mittlerer Lastfaktor von 0,48. Die Abbildung auf Seite 10 bringt die entsprechenden Werte.

Der nukleare Energiebedarf konnte bis 1970 auf Grund der bekanntgewordenen Ausbaupläne abgeschätzt werden. Für die Voraussage der weiteren Entwicklung fehlen allerdings quantitative Anhaltspunkte, wenn auch die Kostentendenzen vermuten lassen, daß auf die Kernenergie ein ständig wachsender Anteil des Leistungszubaus entfallen wird. Hier müssen einigermaßen plausibel erscheinende Arbeitshypothesen weiterhelfen. Um der unvermeidlichen Unsicherheit der Voraussage Rechnung zu tragen und um auch die Abhängigkeit des Bedarfs an Kernbrennstoff von der Ausbaugeschwindigkeit zu unterstreichen, erschien es zweckmäßig, zwei verschiedene Modelle der Bedarfsentwicklung zu benutzen. Dazu wurde einerseits angenommen, daß der nukleare Anteil an den Neuinstallationen zwischen 1970 und 1980 von 15 % auf 50 % ansteigt und bis zum Jahre 2000 konstant bei 50 % bleibt (untere Bedarfsschätzung), andererseits, daß der nukleare Anteil des Zubaus im Jahre 1980 bereits 80 % beträgt und bis zum Jahre 2000 weiter auf 90 % anwächst (obere Bedarfsschätzung).

Der mittlere Lastfaktor der Kernkraftwerke wurde in [16] bis zum Jahre 2000 mit 0,8 angesetzt. Unter der Annahme, daß sie im Laufe der Zeit zunehmend auch zur Deckung des Spitzenbedarfs herangezogen werden, schließt sich bis 2040 ein Abfall auf 0,48 an. In der Durcharbeitung der Strategien (Abschnitt 5 und 6, bzw. Datenblock, Abschnitt 4) haben wir für den Einsatz der Reaktoren - konservativ vorgehend - einen über den gesamten Prognosezeitraum konstanten mittleren Lastfaktor von 0,70 angenommen.

Dieser Unterschied bedeutet nur eine geringfügige Änderung der von M. RECKER benutzten Einschätzung des pro Kopf-Verbrauchs. Tabelle 1 und die Abbildung auf Seite 10 zeigen neben der letzten EURATOM-Schätzung für die EWG [9] die unserer Studie zugrunde gelegte obere und untere nukleare Bedarfskurve für Deutschland.

Tabelle 1 Installierte nukleare Leistung in Deutschland

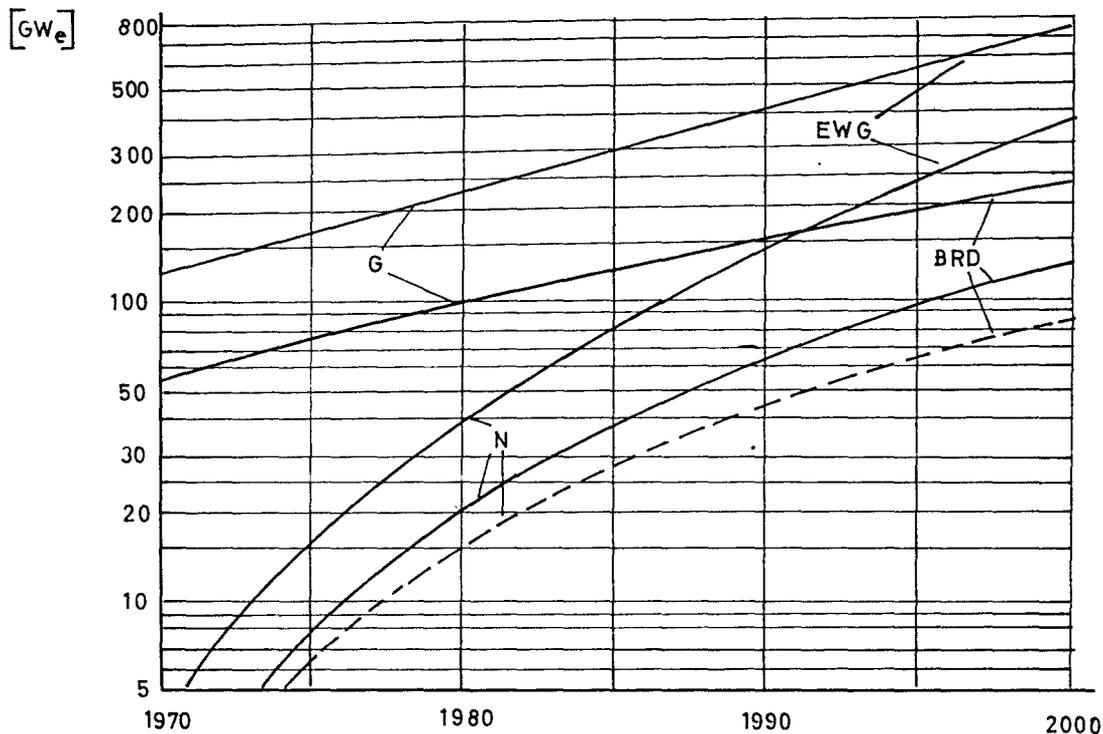
Jahr	Installierte nukleare Leistung in GW <sub>e</sub>		Anteil an der gesamten in- stallierten Leistung in %	
	untere (P <sub>u</sub> ) Bedarfsschätzung	obere (P <sub>o</sub> ) Bedarfsschätzung	untere (P <sub>u</sub> )	obere (P <sub>o</sub> )
1965	-	-	-	-
1970	2	2	3,6	3,6
1975	7	8	9,3	10,6
1980	16	20	16,3	20,4
1990	43	62	28,6	41,3
2000	85	132	37	57
2020	213	310	47	69
2040	405	760	53	100

Die Schätzungen der installierten nuklearen Leistung P in [GW<sub>e</sub>] lassen sich analytisch in folgender Form darstellen:

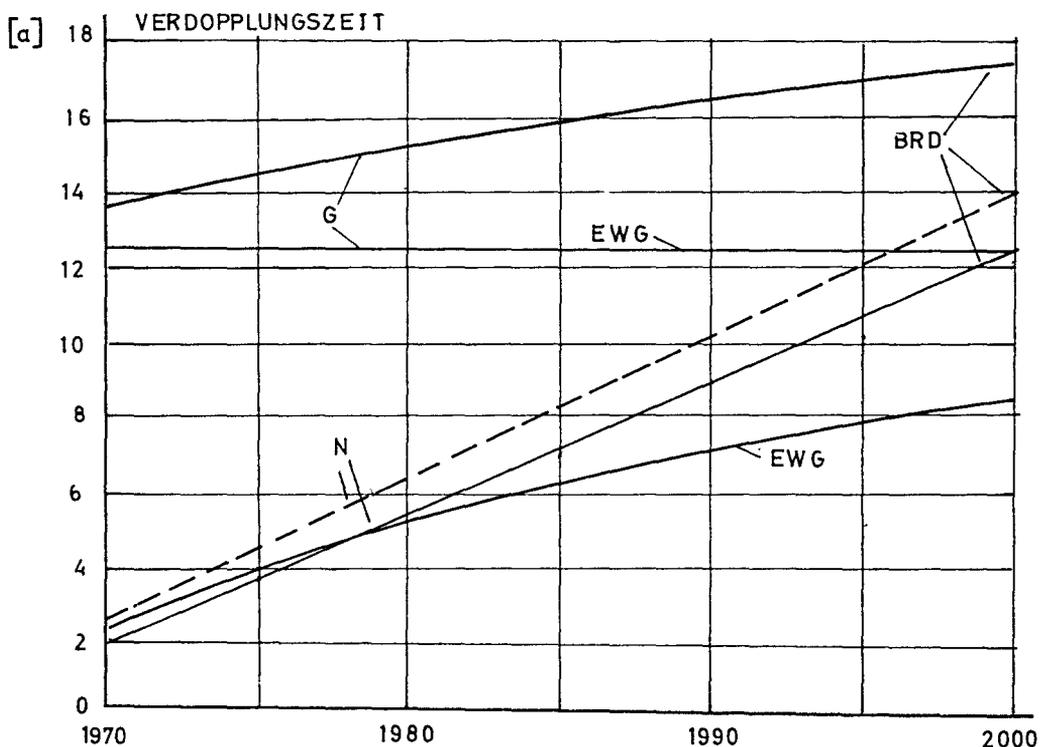
$$\begin{array}{ll}
 \text{untere Schätzung} & P_u = 0,0473 \cdot t^{2,09} \\
 \text{obere Schätzung} & P_o = 0,0302 \cdot t^{2,34}
 \end{array} \quad (1)$$

Die Zeit t ist dabei ab 1964 zu rechnen; die Kurven gelten aber erst ab 1970.

## BEDARFSSCHÄTZUNG FÜR DIE INSTALLIERTE LEISTUNG



G GESAMTE INSTALLIERTE LEISTUNG  
 N NUKLEARER ANTEIL DER INSTALLIERTEN LEISTUNG  
 — OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG  
 --- UNTERE "



Den Wachstumsformeln entspricht, wie auch die Abbildung Seite 10 zeigt, ein lineares Anwachsen der Verdopplungszeit T:

$$\begin{aligned} T_u &= (2^{1/2,09} - 1) \cdot t \\ T_o &= (2^{1/2,34} - 1) \cdot t \end{aligned} \quad (2)$$

Die sich allmählich ausprägende Bedarfssättigung wird durch den häufig benutzten Exponentialanstieg mit konstanter Verdopplungszeit nicht erfaßt.

### 2.3 Kernbrennstoffe - Bedarf und Erzeugung

Ist die in einem bestimmten Reaktortyp installierte Leistung nach 2.2 als Funktion der Zeit vorgegeben, so interessieren die entsprechenden Umsätze an Spalt- und Brutstoffen. Neben dem Abbrand und der Konversion spielen dabei die im Reaktor sowie im Fabrikations- und Aufarbeitungs-kreislauf gebundenen Stoffmengen (Inventare) eine wichtige Rolle, wobei sich überdies die Geschwindigkeit des jährlichen Zuwachses an Reaktoren stark auswirkt.

Um diese dynamischen Effekte zu erfassen, wurden aufbauend auf Arbeiten von R. GIBRAT [19] detaillierte Bilanzgleichungen ausgearbeitet [20], deren Aufbau hier nur kurz angedeutet werden kann. Ausgangspunkt sind Beziehungen für die Durchsätze des Stoffes s, gemessen in [t/a]. Der Durchsatz  $D_F^s$  am Beginn der Brennstoff-Herstellungslinie beträgt

$$\begin{aligned} D_F^s(t) &= \kappa d_o^s \cdot P(t - \delta_B + \delta_F) + \mathcal{V}_o^s \cdot \frac{d}{dt} P(t + \delta_F) \quad \text{für } \frac{dP}{dt} > 0 \\ &= \kappa d_o^s \cdot P(t + \delta_F) \quad \text{für } \frac{dP}{dt} \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Der Ausstoß  $D_W^s$  der Wiederaufarbeitungsanlage ist gegeben durch

$$\begin{aligned} D_W^s(t) &= \kappa d_1^s \cdot P(t - \delta_B - \delta_W) \quad \text{für } \frac{dP}{dt} > 0 \\ &= \kappa d_1^s \cdot P(t - \delta_W) - \mathcal{V}_1^s \cdot \frac{d}{dt} P(t - \delta_W) \quad \text{für } \frac{dP}{dt} \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Darin ist  $P(t)$  in [GW<sub>e</sub>] die Leistung aller Reaktoren des betrachteten Typs i und  $\kappa$  der mittlere Lastfaktor.

Ferner bedeuten

$$d_{oi}^s \quad [t/GW_e \cdot a]$$

Nachfüllfaktor; mißt den durch Abbrand und Fabrikationsverluste bedingten Durchsatz an Stoff s, bezogen auf ein Gigawattjahr

$$d_{li}^s \quad [t/GW_e \cdot a]$$

Entladefaktor; mißt die Menge an Stoff s, die bei Berücksichtigung der Verluste aus der Wiederaufarbeitungsanlage fließt, bezogen auf ein Gigawattjahr

$$\gamma_{oi}^s \quad [t/GW_e]$$

Inventar-Aufbaufaktor; gibt an, welche Menge an Stoff s erforderlich ist, um ein Gigawatt elektrischer Leistung zu installieren (einschließlich Reserveelemente)

$$\gamma_{li}^s \quad [t/GW_e]$$

Inventar-Abbaufaktor; gibt an, welche Menge Stoff s nach Stilllegung von einem Gigawatt elektrischer Leistung und nach Aufarbeitung zur Verfügung steht

$$\delta_{Fi} \quad [a]$$

Fabrikationszeit; reicht von der Brennstoffbereitstellung bis zum Einsatz der Elemente in den Reaktor

$$\delta_{Wi} \quad [a]$$

Wiederaufarbeitungszeit; reicht von der Entladung des Reaktors bis zum Eintreffen des Brennstoffs im Lager

$$\delta_{Bi} \quad [a]$$

Beschickungsverzögerung; setzt in Rechnung, daß die erste Nachfüllung erst gewisse Zeit nach der Inbetriebsetzung eines Kernkraftwerks erfolgt.

Der Stoffindex s bezieht sich im allgemeinen auf die verschiedenen Spalt- und Brutnuklide. Wir betrachten im folgenden Natururan ( $s = n$ ), spaltbares Plutonium ( $s = p$ ) und Thorium ( $s = t$ ).

Durch geeignetes Zusammenkoppeln von Gleichungen der Form (3) und (4), ggf. unter Einschaltung der Stoffbilanz einer Diffusionsanlage, erhält man den durch die betrachtete Reaktorpopulation bedingten Netto-Jahresbedarf  $Z^s(t)$  an Stoff s in einer Eintypenstrategie. Handelt es sich um Mehrtypen-Strategien, so können die  $Z_i^s$  verschiedener Populationen i unschwer zusammenschaltet werden.

Das wichtigste Beispiel ist die auf gemeinsamem Pu-Haushalt von Brütern (B) und Konvertern (K) beruhende Zweitypen-Strategie unserer Studie (Abschnitt 6). Diese Strategie wird beherrscht von der Differenzen-

Differentialgleichung

$$Z^P(t) = \sum_{i=B,K} \left[ D_F^P(t) - D_W^P(t) \right] \quad (5)$$

Darin bedeutet  $Z^P(t)$  eine äußere Pu-Quelle, die in unseren Beispielen Null gesetzt wird.

Eine ausführliche Darlegung des Verfahrens findet sich in [20] und [15].

#### 2.4 Kostenermittlung

Wie beim Massenflußbild haben wir auch bei der Kostenermittlung versucht, in die Details soweit wie möglich einzudringen. Die Grenze wurde durch die erreichbaren Daten gesetzt. Die Kostenermittlung beruht durchgehend auf der Barwertmethode (present worth method).

Die spezifischen Investitionskosten  $k_I$  in [Dpf/kWh] wurden nach folgender Formel errechnet:

$$k_I = \frac{1}{8760 \cdot \kappa} \left\{ K_A \left[ \frac{R + S}{1 - \left(1 + \frac{R+S}{100}\right)^{-L}} + (V_S + V_H) \right] + K_D (R+S+V_S+V_H) \right\} \quad (6)$$

Darin bedeuten:

- $K_A$  [DM/kW<sub>e</sub>] .... spezifische Anlagekosten; umfassen die direkten und die indirekten Anlagekosten sowie die Bauzinsen
- $K_D = 100$  [DM/kW<sub>e</sub>].... D<sub>2</sub>O-Kosten
- $R = 7$  [% / a] .... Zinsfaktor für Fremd- und Eigenkapital
- $S = 2,7$  [% / a] .... Steuersatz
- $V_S = 0,5$  [% / a].... Sachversicherung
- $V_H = 0,5$  [% / a].... Haftpflichtversicherung
- $L = 25$  [a] .... Anlagen-Lebensdauer

Die Ermittlung des Brennstoffkostenanteils nach der Barwertmethode ist ziemlich kompliziert. In voller Allgemeinheit ist dieses Problem von H.SCHMALE et.al.[21] behandelt worden. Das von uns benutzte Verfahren [22] stellt

im wesentlichen eine vereinfachte Fassung davon dar und beruht auf der Näherungs-Formel

$$k_{Br} = \frac{R \cdot \delta}{E_1 \sqrt[100]{1 - (1+R)^{-L}}} \left\{ \vartheta \sqrt[100]{k_o^{\#} - k_1^{\#} (1+R)^{-L}} + \frac{k_o^{\#} - k_1^{\#}}{Z} \cdot \frac{(1+R)^{-\frac{\delta_B}{100}} - (1+R)^{-L}}{1 - (1+R)^{-\frac{\delta_R}{100}}} \right\} \quad (7)$$

für den mittleren Brennstoffkostenanteil  $k_{Br}$  in  $\sqrt[100]{\text{Dpf/kWh}}$ .

Darin bedeuten:

- $k_o^{\#} \sqrt[100]{\text{DM/kg}}$  .... Barwert der Kosten (incl. Steuern) des frischen Brennstoffs, bezogen auf den Zeitpunkt des Brennstoff-Einsatzes in den Reaktor
- $k_1^{\#} \sqrt[100]{\text{DM/kg}}$  .... Barwert des Nettoerlöses (incl. Steuern) für den verbrauchten Brennstoff, bezogen auf den Zeitpunkt der Entnahme des Brennstoffs aus dem Reaktor
- $E_1 \sqrt[100]{\text{kWh/kg}}$  .... Energieentnahme aus dem Brennstoff
- $\vartheta \sqrt[100]{1}$  .... Mehrbedarf für Reserveelemente
- $\delta_R \sqrt[100]{a}$  .... Einsatzdauer des Brennstoffs im Reaktor
- $Z \sqrt[100]{1}$  .... Zahl der Teilladungen im Reaktor

Die Größen  $k_o^{\#}$  und  $k_1^{\#}$  ihrerseits sind definiert durch

$$k_o^{\#} = \sqrt[100]{1 + \frac{S}{100} (\delta_F + \frac{1}{2} \delta_R)} \cdot (1 + \frac{R}{100})^{\delta_F} \cdot (K_F + \frac{1}{100} \sum_S m^S x_o^S K_o^S) \quad (8)$$

$$k_1^{\#} = \sqrt[100]{1 - \frac{S}{100} (\delta_W + \frac{1}{2} \delta_R)} \cdot (1 + \frac{R}{100})^{-\delta_W} \sqrt[100]{\frac{1}{100} \sum_S v_1^S x_1^S K_1^S - (K_A + K_{TR} + K_R)} \quad (9)$$

Darin bedeuten:

- $K_F \sqrt[100]{\text{DM/kg}}$  .... Fabrikationskosten des Brennstoffs, bezogen auf 1 kg der in ihm enthaltenen Spalt- und Brutstoffe
- $K_o^S; K_1^S \sqrt[100]{\text{DM/kg}}$  .... Kosten der einzelnen Komponenten s des Brennstoffs bei Einsatz (o) bzw. Entnahme (1)
- $x_o^S; x_1^S \sqrt[100]{\%}$  .... Anteil der Komponente s am Brennstoff bei Einsatz (o) bzw. Entnahme (1)

$m^S$	$[1]$	.... Mehrbedarfsfaktor, berücksichtigt Fabrikationsverluste
$v^S$	$[1]$	.... Aufarbeitungs-Verlustfaktor
$K_A, K_{TR}, K_R$	$[DM/kg]$	.... Kosten für Aufarbeitung, Transport und Rekonversion.

### 3. Zur Frage der Kernbrennstoffreserven

#### 3.1 Vorbemerkungen

Bei der Beurteilung der verschiedenen Strategien spielen neben den jeweils erforderlichen Mengen an Kernbrennstoff auch die Brennstoffpreise, die in  $k_O^{\$}$  und  $k_1^{\$}$  eingehen, eine entscheidende Rolle. Diese Preise entwickeln sich im Spiel von Angebot und Nachfrage; sie könnten daher vorausgesagt werden, wenn das Angebot, d.h. die Uran- und Thorium-Reserven der Erde und die Nachfrage, d.h. die nuklearen Ausbaupläne aller Länder, hinreichend gut bekannt wären. Wie wir weiter unten zeigen, lassen sich jedoch über die Kernbrennstoffvorräte nur sehr vage Aussagen machen. Das gleiche gilt für die Ausbaupläne.

Wir haben uns daher - wie bei den Ausbauprognosen - darauf beschränkt, zwei plausibel erscheinende Preisentwicklungen als Arbeitshypothesen durchzuspielen, um den Einfluß von Preisänderungen abzuschätzen. Es ist dabei von vorneherein zu erwarten, daß sich z.B. eine Erhöhung der Uranpreise nur wenig auf die nuklearen Energieerzeugungskosten auswirkt, da in diesen die Brennstoffkosten nur eine zweitrangige Rolle spielen. Umso mehr ist es gerechtfertigt, mit Preismodellen zu arbeiten.

Die Hypothese II nimmt als "optimistischen" Grenzfall an, daß die Kosten der Kernbrennstoffe ständig auf dem für 1970-80 charakteristischen, in Tabelle 2 wiedergegebenen Niveau verbleiben, das einigermaßen gut belegt werden kann.

Um den Effekt von etwaigen Preissteigerungen deutlich zu erfassen, wurde dem eine "pessimistische" Hypothese I gegenübergestellt, die ebenfalls in Tabelle 2 verzeichnet ist.

Tabelle 2 Grenzfälle der Preisentwicklung für Kernbrennstoffe

S t o f f	II optimistisch	1970-85	I pessimistisch	
	1970-2040		1985-2000	2000-2040
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (\$ / lb)	8	8	20	30
ThO <sub>2</sub> (\$ / lb)	8	8	20	30
Pu (\$ / g spaltb.)	10	10	27,5	27,5

Zu diesen Richtwerten führen folgende Überlegungen:

### 3.2 Weltvorräte an Uranerzen

Die zwischen 1959 und 1964 publizierten Schätzungen der Welt-Uran-Vorkommen schwanken beträchtlich. 1959 [23] und 1960 [24] wurden die Vorräte an billigem Uran (unter 8 - 10 \$ / lb U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) auf etwa 1 Mio t geschätzt, und es wurde vermutet, daß bis zum Jahre 2000 noch weitere 3 Mio t zum gleichen Preis abgebaut werden können. Die billigen Vorräte der USA wurden 1962 [25] auf ca. 0,8 Mio t geschätzt, die in der 10 - 30 \$-Kategorie auf weitere 0,7 Mio t. Die neuesten Schätzungen von 1964 [26] beziffern die nach 1980 noch verbleibenden Vorräte der USA mit 0,275 - 0,320 Mio t in der niedrigsten und mit 0,630 Mio t in der nächsthöheren Preiskategorie.

Stellt man die neuesten Schätzungen den bekannt gewordenen Ausbauplänen gegenüber, so läßt sich bereits in den 80er Jahren eine Erschöpfung der bisher bekannten billigen Vorräte absehen, verbunden mit dem Übergang zu höheren Preiskategorien. Es ist jedoch anzunehmen, daß die Uranpreise in absehbarer Zeit nicht allzu hoch anwachsen werden. Zunächst würde durch die Möglichkeit, bis zu 10<sup>9</sup> t Uran aus dem Meerwasser zu gewinnen [27], der Preisentwicklung bei etwa 30 \$ / lb U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> eine obere Grenze gesetzt werden. Mit wachsendem Uranbedarf wird außerdem die seit Jahren eingeschränkte Uran-Prospektion voraussichtlich zur Erschließung neuer Reserven führen. Schließlich wird der Einsatz schneller Brutreaktoren zur drastischen Senkung des Uranbedarfs führen.

Extrapoliert man die USA-Werte in [25] nach den bisher maßgebenden Relationen aufs Weltganze, so ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Größenordnungen.

Da auf Deutschland etwa 5 % der in der Welt erzeugten Elektroenergie entfallen, kann man als Richtwert annehmen, daß von Deutschland etwa 5 % dieser Vorräte in Anspruch genommen werden können. Wenn der deutsche Natururan-Bedarf in diesem Rahmen verbleibt - wie wir bei den Zweitypenspielen zeigen werden, ist dies durchaus möglich - so folgt, daß sich deutsche Entscheidungen auf dem Kernenergiegebiet kaum auf den Uran-Markt auswirken werden. Ein Argument dafür, die Aussagen von optimalisierenden Planspielen, die nur von der deutschen Situation ausgehen, sehr zurückhaltend zu bewerten.

Legt man die mittlere Uran-Verbrauchskurve der von uns untersuchten Strategien zugrunde, so ergeben sich die in Tabelle 3 rechts angegebenen Zeitabschnitte, für die die links stehenden Preiskategorien charakteristisch sind. Dies entspricht der Hypothese I in Tabelle 2.

Tabelle 3 Uran-Vorräte und Preisentwicklung

Preiskategorie \$/lb $U_3O_8$	Weltvorräte $10^6$ t $U_3O_8$	davon für Deutschland verfügbar $10^3$ t $U_3O_8$	ausreichend für
8	1	50	1970 - 1985
20	1	50	1985 - 2000
30	2,4	120	2000 - 2040

In unseren von Tabelle 2 ausgehenden Rechnungen wurde auch die Abhängigkeit der Kosten des angereicherten Urans von der optimalen Abfallkonzentration der Diffusionsanlagen berücksichtigt, unter der Voraussetzung, daß die Trennarbeitskosten ständig bei \$ 30/kg bleiben.

### 3.3 Plutonium-Preise

Das Problem des Plutonium-Preises birgt eine Reihe von Annahmen über das Verhältnis der Konverter- zur Brüterleistung im Weltmaßstab in sich, die trotz eingehender theoretischer Arbeiten, z.B. [26], noch keine schlüssigen Aussagen zulassen. Wir haben daher wie in 3.2 unsere Preismodelle auf Plausibilitätsüberlegungen gegründet (vgl. Tabelle 2). In [3, 29, 30] wurde dargelegt, daß der "Gebrauchswert" von Plutonium als U-235-Ersatz in thermischen Reaktoren bei DM 40/g spaltb. liegt, sofern die für 1970-80 vermuteten Kosten für U-235 zugrunde gelegt werden.

Bei höheren Plutonium-Preisen würde die Rückführung des Plutoniums in thermische Reaktoren unvorteilhaft werden. Da die Periode 1970-80 durch die Dominanz der thermischen Reaktoren gekennzeichnet ist, wird sich auch der Plutonium-Preis in der erwähnten Größenordnung halten. Die Hypothese II geht nun dahin, daß dieses Preisniveau bis zum Jahre 2040 gleichbleibt.

Zur Hypothese I führt folgende Argumentation: Ab Mitte der 80er Jahre kann durch den Bau von Brütern die Nachfrage nach Pu verstärkt werden. Dies würde eine Erhöhung des Pu-Preises zur Folge haben. Kritikalitätsberechnungen zeigen wie gesagt, daß 1 g spaltbares Plutonium im schnellen Brüter reaktivitätsmäßig etwa 1,5 g U-235 entspricht. Mit dem Faktor 1,5 ergibt sich aus dem U-235-Preis ein Gebrauchswert von DM 110.--/g Plutonium spaltbar. Bei höheren Plutonium-Preisen würde es lohnend sein, U-235 in die schnellen Brüter einzusetzen. Dadurch ist der Plutonium-Preis für die angegebene Periode mit dem Uran-Preis der Zeit 1985-2000 gekoppelt. Nach dem Jahre 2000 wird keine Änderung des Plutonium-Preises angenommen, da die Brüter dann schon genügend Plutonium produzieren, von äußeren Spaltstoffquellen also unabhängig sein werden, und man eher einen Preisverfall erwarten kann.

### 3.4 Preisentwicklung für Abfall-Uran, Thorium und U-233

Der Preis des Abfall-Urans wurde für den gesamten betrachteten Zeitraum mit dem jetzigen Preis von DM 12/kg gleichgesetzt. Die Annahme einer Preisabhängigkeit vom Uran-Konzentratpreis würde hier der Tatsache widersprechen, daß Diffusionsanlagen und Konverter schon von Anfang an große Mengen von Abfall-Uran erzeugen, und der Bedarf der Brüter (die die einzigen Verbraucher von Abfall-Uran sind) nur einen kleinen Bruchteil davon ausmacht.

Die Preise von Thoriumoxyd ( $\text{ThO}_2$ ) folgen derzeit in etwa denen des Uran-Konzentrats. Es wurde daher in erster Näherung die gleiche Preisentwicklung zugrunde gelegt wie bei Uran-Konzentrat.

Da U-233 beim Reaktortyp THTR immer wieder in den Reaktor zurückläuft, ohne daß sich ein Überschuß oder ein Zufuhrbedarf ergibt, haben wir - der Argumentation von [28] folgend - dafür keinen Preis festgesetzt.

#### 4. Erläuterungen zu den Reaktordaten

In Abschnitt 2.1 wurden bereits die Referenzen für die Herkunft der Reaktordaten in Tabelle 4 und 5 aufgezählt.

Die elektrische Nettoleistung P wurde auf 1000 MWe normiert, um vergleichbare Zahlen zu erhalten; insbesondere war dies bei den Reaktoren LWR(ORNL), GG(CEA) und Na-BR(GE) erforderlich.

Bei der mittleren spezifischen Leistung r und dem mittleren Abbrand a ist zu beachten, daß für die Brutreaktoren Core und Blanket als Ganzes zum Brennstoff gerechnet werden. Diese Definition führt auf ungewohnt kleine Zahlen.

Die Beschickungsverzögerungen  $\delta_B$  sind bei Reaktoren mit Teilladungsbetrieb aus dem Quotienten von Standzeit und Teilladungs-Anzahl gewonnen und bei kontinuierlicher Beschickung mit  $0,5 [a]$  angesetzt worden.

Die Aufarbeitungsdauer  $\delta_w$  und die Fabrikationsdauer  $\delta_F$  wurden, sofern sie nicht wie bei den Brutreaktoren durch den äußeren Brennstoffzyklus festgelegt sind, verhältnismäßig optimistisch mit 0,6 bzw. 0,5 Jahren angesetzt, wodurch der zukünftigen Entwicklung bereits Rechnung getragen ist. Die kürzeren Zykluszeiten bei den Brutreaktoren ergeben sich aus der Überlegung, daß jeweils nur wenig Brennstoff im äußeren Zyklus gebunden sein darf, da sonst zu hohe unproduktive Kapitalbindungen eintreten würden. Die gesamte äußere Zykluszeit ergibt sich beim Na-1 BR(KFK) mit drei Teilladungen zu  $1/3$  Standzeit und beim Na-BR(GE) mit 5 Teilladungen zu  $2/5$  Standzeit.

Die Nachfüll-, Inventar- und Entladefaktoren sind bereits im Abschnitt 2.3 näher erläutert worden.

Am Fuß der Tabelle finden sich die der Hypothese I (Tabelle 2) bei festen Trennarbeitskosten entsprechenden Abfallkonzentrationen der Diffusionsanlage (vgl. Abschnitt 3.4).

Die spezifischen Anlagekosten  $K_A$  enthalten die direkten Anlagekosten sowie die indirekten Anlagekosten in Form von Aufwendungen des Bauherrn, Bauzinsen und Unvorhergesehenes. Die indirekten Kosten wurden, um eine gemeinsame Vergleichsbasis zu schaffen, für alle Reaktoren in gleicher Weise berechnet und zwar so, daß zu den direkten Anlagekosten 30 % bauherrnseitige Aufwendungen und Unvorhergesehenes kommen und auf diese Gesamtanlagekosten 11 % Bauzinsen für die gesamte Bauzeit aufgeschlagen werden. Beim  $D_2O$ -Reaktor kommen zu den Anlagekosten noch die nicht abzuschreibenden Kosten (Zinsen + Steuern + Versicherungen) für das  $D_2O$  hinzu.

Die jährlichen Betriebskosten  $K_B$  wurden, um eine einheitliche Basis für alle Reaktoren zu gewinnen, gleich hoch angesetzt; nur beim  $D_2O$ -Reaktor kommen die Kosten für die  $D_2O$ -Verluste hinzu.

Die Angaben für die Brennstoff-Fabrikationskosten  $K_F$  entstammen den einzelnen Referenzen. Wegen der Aufarbeitungskosten  $K_A$  sowie der Transport- und Rekonversionskosten  $K_T$  bzw.  $K_R$  wird auf den ausführlichen Bericht [15] verwiesen.

Die auf die kWh bezogenen spezifischen Investitions- und Brennstoffkosten  $k_I$  bzw.  $k_{Br}$  ergeben sich unter Benutzung der obigen Kostendaten nach den Formeln (6) und (7) bei einem Lastfaktor von  $0,7 \hat{=} 6000$  h/a.

Die  $U_3O_8$ -Konzentratpreise und die damit gekoppelten Plutonium-Preise der Hypothese I (vgl. Abschnitt 3) sind hier noch einmal aufgeführt.

Tabelle 4

## TECHNISCHE REAKTORDATEN

Bezeichnung	Symbl.	Dim.	LWR(ORNL)			LWR(SSW)			GG(GEA)			D <sub>2</sub> O(SSW)			AGR(UKAEAE)			THTR(GA)			Na-BR(GE)			NaI-BR(KFK)		
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
el. Nettoleistung	P	MW <sub>e</sub>	1000			1000			1000			1000			1000			1000			1000			1000		
Anlagen Wirkungsgrad	$\eta$	1	0.31			0.32			0.32			0.33			0.41			0.44			0.44			0.40		
mittl. spez. Leistung	r	MW/kgBr.	0.031			0.027			0.0062			0.020			0.018			0.024			0.0614			0.0415		
mittl. Abbrand	a	MWd/kgBr.	21.0			24.0			5.0			9.0			20.0			57.1			39.0			22.86		
Beschickungs-Verz.	$\delta_g$	a	0.88			0.87			0.50			0.50			0.50			0.78			0.50			0.72		
Aufarbeitungsdauer	$\delta_w$	a	0.60			0.60			0.60			0.60			0.60			0.60			0.50			0.50		
Fabrikationsdauer	$\delta_f$	a	0.50			0.50			0.50			0.50			0.50			0.50			0.25			0.22		
Abreicherungs-niveau			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
U <sub>nat</sub>	d <sub>0</sub> <sup>n</sup>	$\frac{t}{GWd}$	241.3	212.0	202.9	288.5	250.4	238.5	230.4	230.4	230.4	124.1	124.1	124.1	196.5	172.5	164.9	73.36	61.81	58.19	19.69	19.69	19.69	38.33	38.33	38.33
Pu	d <sub>0</sub> <sup>p</sup>	$\frac{t}{GWd}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	1.205	1.205	1.205	1347	1347	1347
Th	d <sub>0</sub> <sup>t</sup>	$\frac{t}{GWd}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.73	13.73	13.73	-	-	-	-	-	-
U <sub>nat</sub>	d <sub>1</sub> <sup>n</sup>	$\frac{t}{GWd}$	470.2	413.2	395.3	737.8	640.4	609.9	514.2	514.2	514.2	154.6	154.6	154.6	604.0	530.2	507.1	502.1	423.0	398.2	35.98	35.98	35.98	60.74	60.74	60.74
Pu	d <sub>1</sub> <sup>p</sup>	$\frac{t}{GWd}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	2.202	2.202	2.202	2134	2134	2134
Th	d <sub>1</sub> <sup>t</sup>	$\frac{t}{GWd}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93.96	93.96	93.96	-	-	-	-	-	-
U <sub>nat</sub>	d <sub>1</sub> <sup>n</sup>	$\frac{t}{GWd}$	44.96	46.38	46.83	87.25	80.63	78.55	0	0	0	0	0	0	42.33	42.42	42.45	22.35	18.85	17.75	18.18	18.18	18.18	36.29	36.29	36.29
Pu	d <sub>1</sub> <sup>p</sup>	$\frac{t}{GWd}$	0.2388	0.2388	0.2388	0.3119	0.3119	0.3119	0.3819	0.3819	0.3819	0.3133	0.3133	0.3133	0.1337	0.1337	0.1337	-	-	-	1.414	1.414	1.414	1.712	1.712	1.712
Th	d <sub>1</sub> <sup>t</sup>	$\frac{t}{GWd}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12.80	12.80	12.80	-	-	-	-	-	-

Zeitabschnitt	1970 - 1985	1986 - 2000	2001 - 2050
Abreicherungs-niveau	a	b	c
U-235 im Abfall der Diffusionsanlage	0.2531	0.1668	0.1329

Tabelle 5

REAKTOR - KOSTENDATEN

Bezeichnung	Symb	Dim.	LWR (ORNLI)			LWR (SSW)			GG (CEA)			D <sub>2</sub> O (SSW)			AGR (UKAEA)			THTR (GA)			Na-BR (GE)			NaI-BR (KFK)			
			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
Spez. Anlagekosten	K <sub>I</sub>	$\frac{DM}{kWh}$	532.8			577.2			692.6			634.9			606.0			467.3			634.9			599.4			
Jährh. Betriebskosten	K <sub>B</sub>	$\frac{DM}{a}$	7.3 · 10 <sup>6</sup>			7.3 · 10 <sup>6</sup>			7.3 · 10 <sup>6</sup>			8.3 · 10 <sup>6</sup>			7.3 · 10 <sup>6</sup>			7.3 · 10 <sup>6</sup>			7.3 · 10 <sup>6</sup>			7.3 · 10 <sup>6</sup>			
Fabrikationskosten	K <sub>F</sub>	$\frac{DM}{kgBr.}$	250			300			71			200			300			1000			476			300			
Aufarbeitungskosten	K <sub>A</sub>	$\frac{DM}{kgBr.}$	100			100			80			90			100			200			120			260			
Transportkosten	K <sub>TR</sub>	$\frac{DM}{kgBr.}$	40			40			30			30			40			40			40			100			
Rekonversionskosten	K <sub>R</sub> <sup>U</sup> K <sub>R</sub> <sup>T</sup>	$\frac{DM}{kg}$	22.4			22.4			-			-			22.4			22.4			-			-			
			6			6			6			6				6			-			6			6		
Preisniveau				a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Spez. Investitionskosten	k <sub>I</sub>	$\frac{Dpf}{kWh}$	1.022	1.022	1.022	1.107	1.107	1.107	1.329	1.329	1.329	1.218	1.218	1.218	1.163	1.163	1.163	0.915	0.915	0.915	1.218	1.218	1.218	1.150	1.150	1.150	
Spez. Betriebskosten	k <sub>B</sub>	$\frac{Dpf}{kWh}$	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.135	0.135	0.135	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	0.119	
Spez. Brennstoffkosten	k <sub>Br</sub>	$\frac{Dpf}{kWh}$	0.766	0.945	1.225	0.891	1.087	1.415	0.741	0.861	1.155	0.564	0.547	0.724	0.733	0.966	1.213	0.763	0.964	1.117	0.278	0.425	0.425	0.380	0.380	0.380	
Spez. Energiekosten	k <sub>E</sub>	$\frac{Dpf}{kWh}$	1.907	2.090	2.306	2.117	2.313	2.641	2.189	2.309	2.603	2.092	2.075	2.252	2.015	2.248	2.495	1.998	1.998	2.151	1.615	1.762	1.762	1.618	1.618	1.649	

Zeitabschnitt	1970 - 1985			1986 - 2000			2001 - 2050		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Preisniveau									
Urankonzentrationspreis	$\frac{\$}{lb U_3O_8}$	8		20		30			
	$\frac{DM}{kg U_3O_8}$	70.48		176.21		264.31			
Plutoniumpreis	$\frac{DM}{g spaltb Pu}$	40		108.8		108.8			

## 5. Erläuterungen zu den Eintypen-Strategien

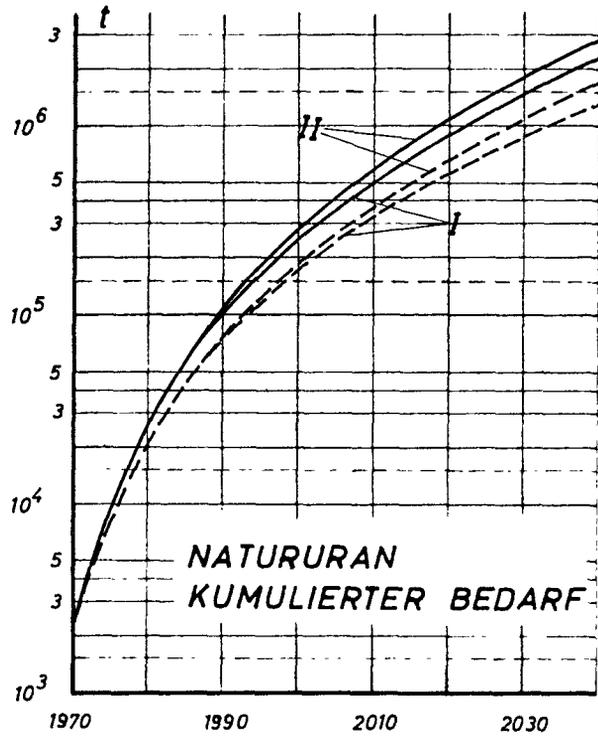
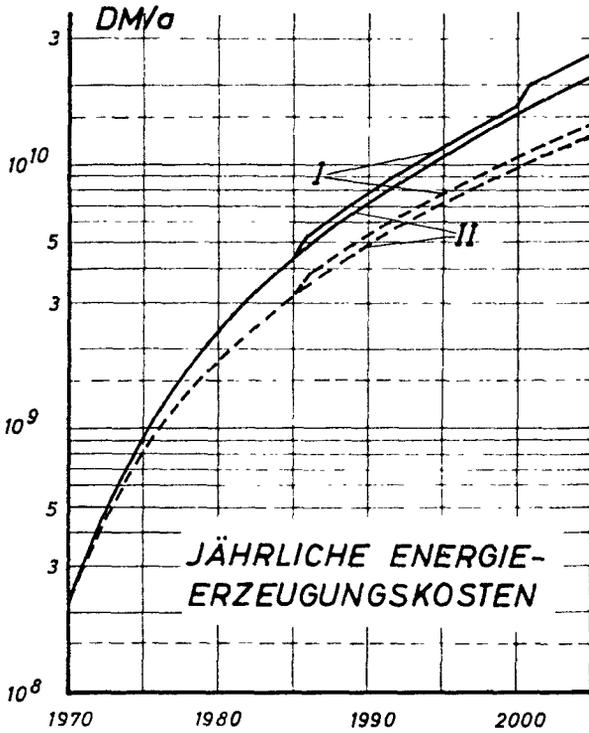
Die Eintypen-Strategie ist dadurch gekennzeichnet, daß der nukleare Energiebedarf ausschließlich durch den Zubau eines bestimmten Reaktortyps gedeckt wird. Die Abbildungen auf den Seiten 24 bis 37 bringen die Ergebnisse für jeweils einen der in den Tabellen 4 und 5 gekennzeichneten Reaktoren.

In allen Abbildungen werden die Ergebnisse für die obere Bedarfsschätzung in vollen Linien, für die untere Bedarfsschätzung in unterbrochenen Linien dargestellt. Die Abbildungen zeigen jeweils links oben die jährlichen Energieerzeugungskosten, rechts oben den kumulativen Natururan-bedarf bzw. bei den Brütern den Plutonium-Bedarf. Links unten ist der kumulative Ausstoß bzw. Bedarf von Abfall-Uran aus den Diffusionsanlagen dargestellt. Rechts unten ist der kumulative Ausstoß an spaltbarem Plutonium wiedergegeben, ausgenommen die Abbildung Seite 29, die an dieser Stelle den Thorium-Bedarf zeigt.

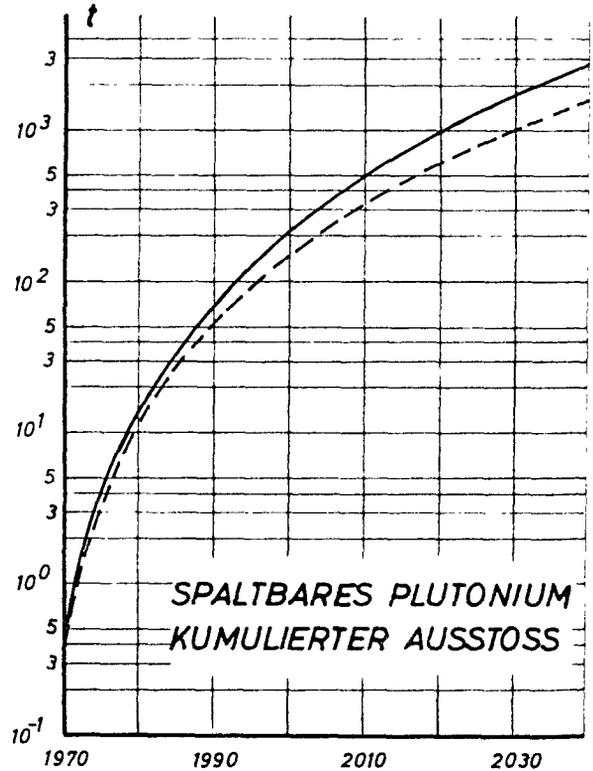
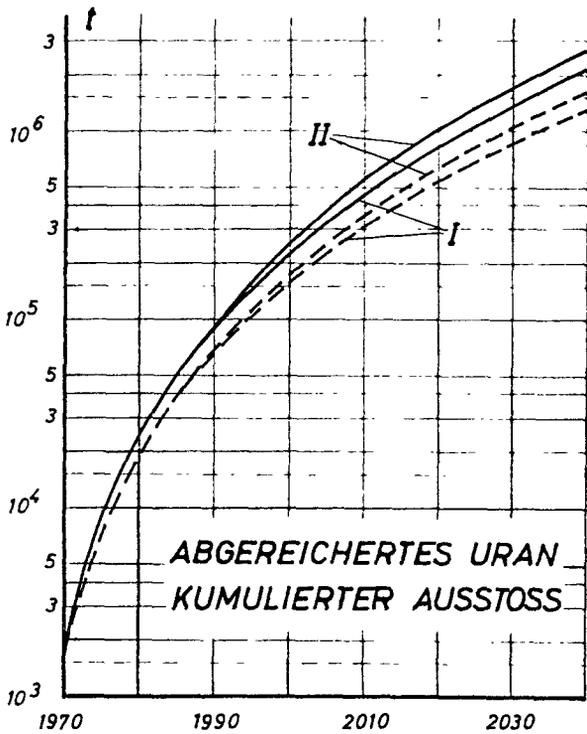
Die Kurven spalten sich z.T. ab 1985 entsprechend den Hypothesen I und II der Uran- und Plutonium-Preisentwicklung (vgl. Tabelle 2) auf. Bei den Jahreskosten leuchtet dies unmittelbar ein. Bei den kumulativen Natur- und Abfall-Uranmengen wirken sich die Preissteigerungen der Hypothese I über die Veränderung der Abfallkonzentration der Diffusionsanlagen (Tabelle 4 und 5) verringernd aus.

Bei den schnellen Brütern wird der kumulative Plutonium-Ausstoß erst dann positiv, wenn der jährliche Ausstoß den jährlichen Verbrauch übersteigt und die bis dahin angesammelte Plutonium-Bedarfsmenge abgebaut ist. Dieser anfängliche Bedarf ist bei den schnellen Brütern im Diagramm rechts oben kumuliert aufgetragen. Das Maximum gibt die Jahreszahl an, von der ab kein Plutonium mehr zugeführt werden muß.

EINTYPENSTRATEGIE LWR (ORNL)

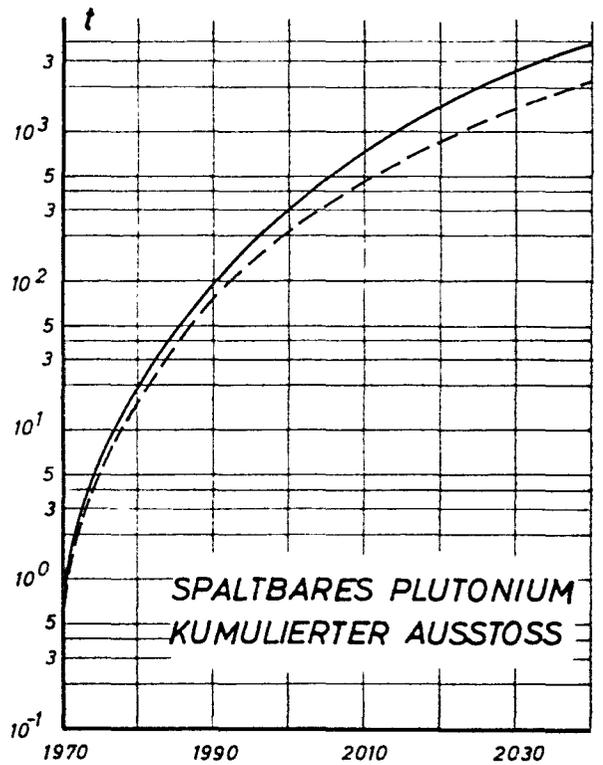
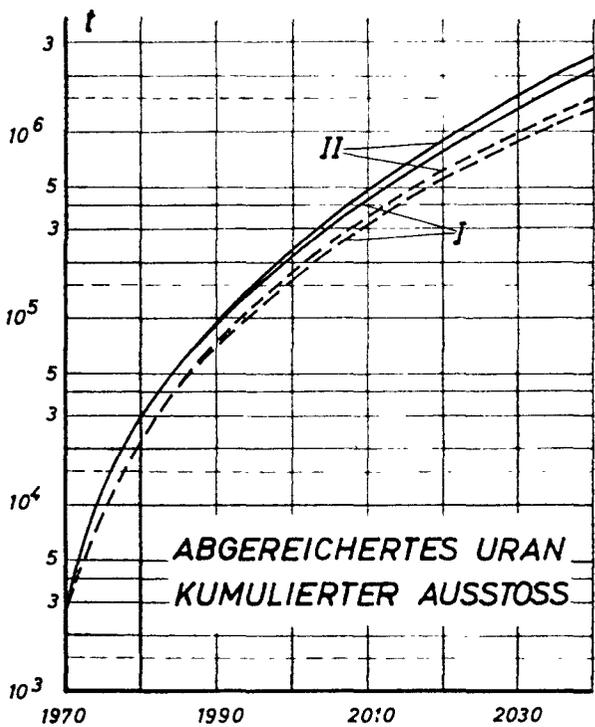
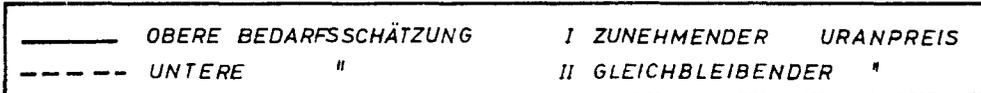
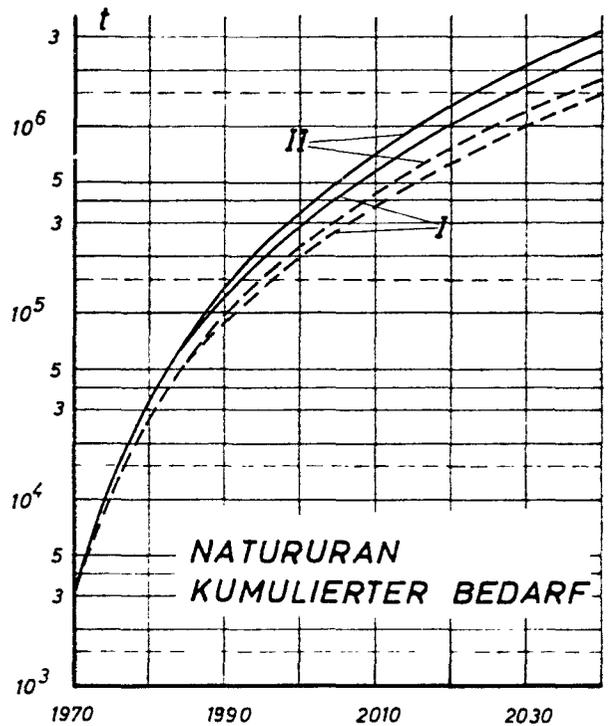
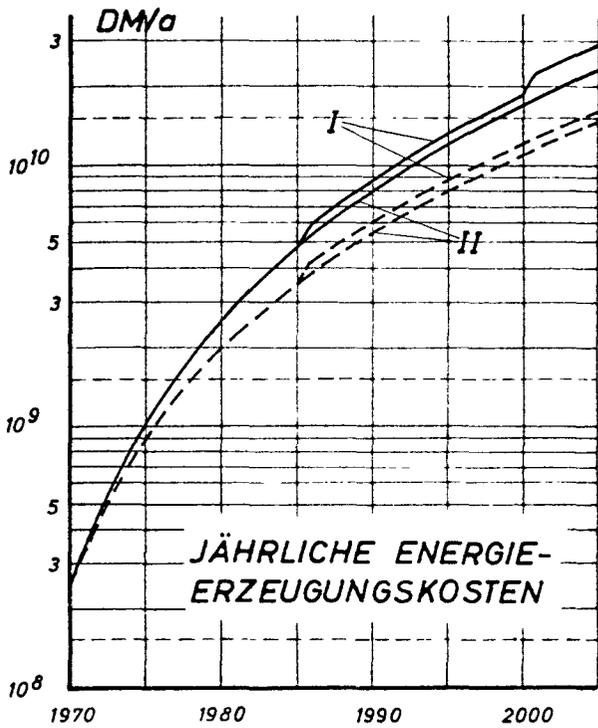


—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE " "	II	GLEICHBLEIBENDER " "



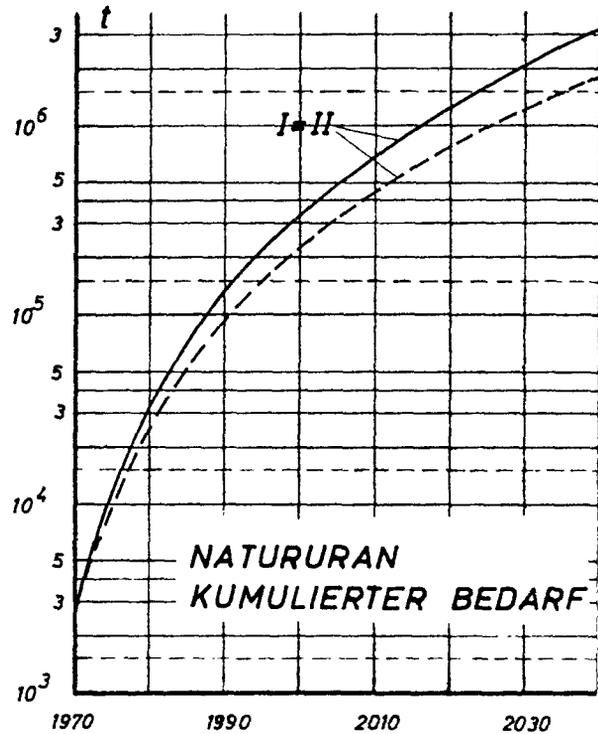
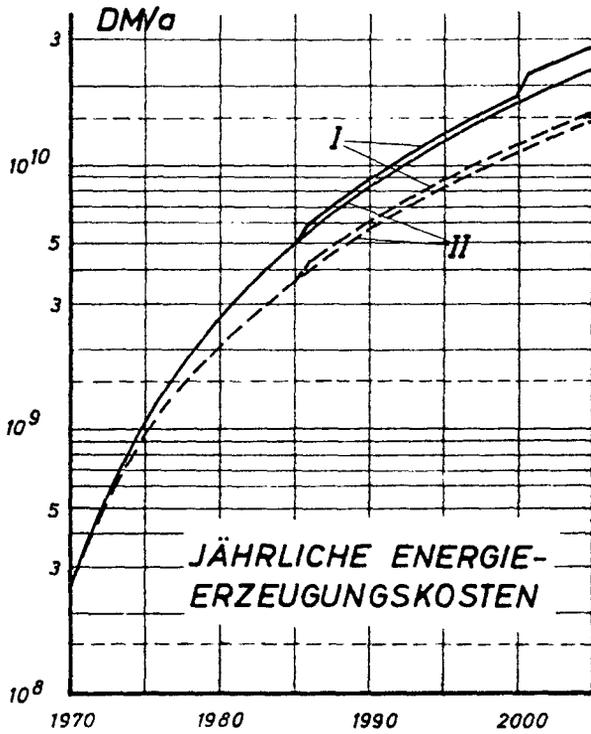
EINTYPENSTRATEGIE

LWR (SSW)

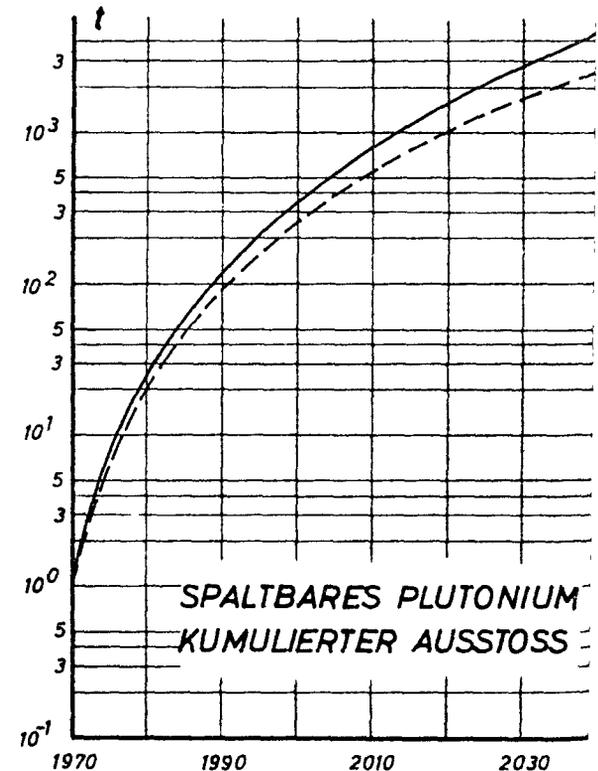
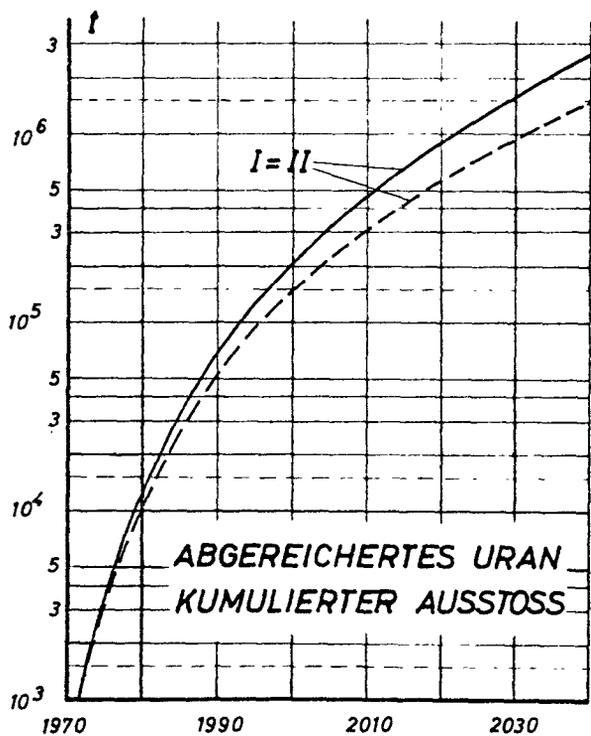


EINTYPENSTRATEGIE

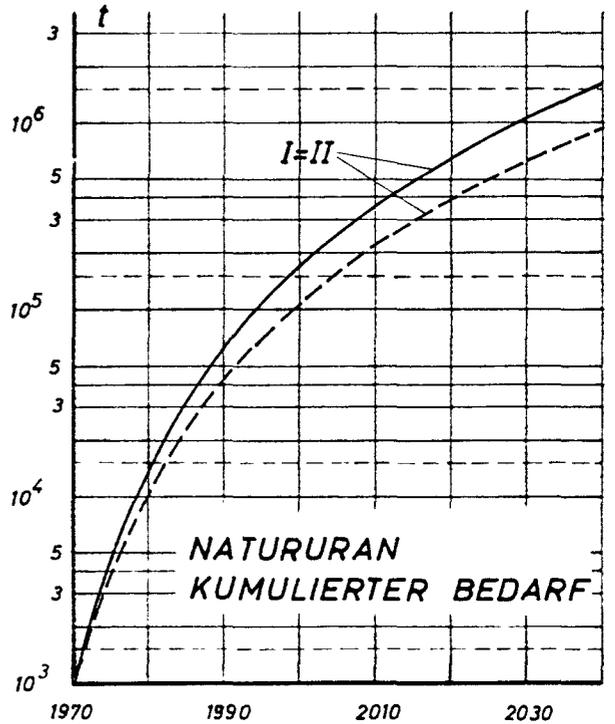
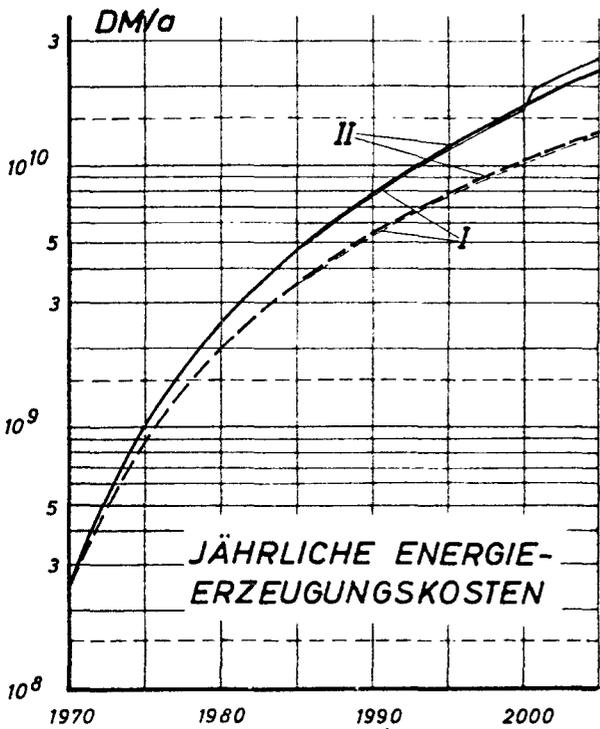
GG (CEA)



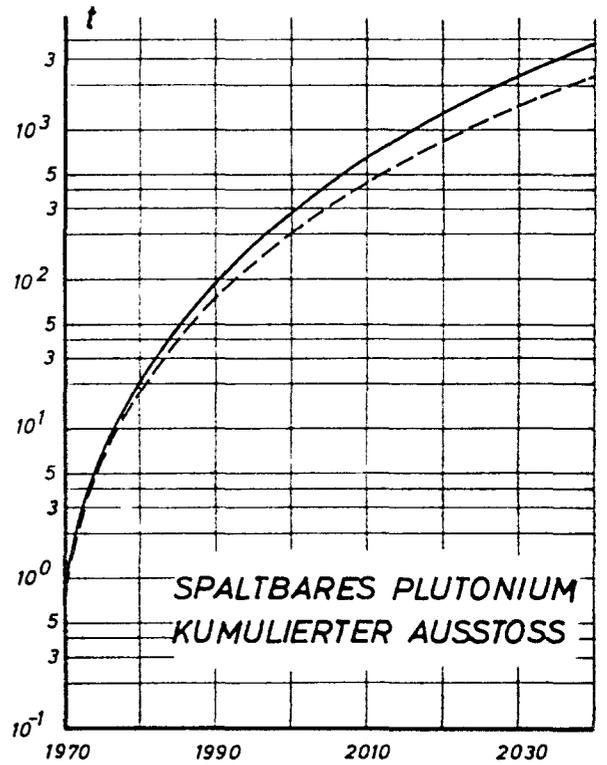
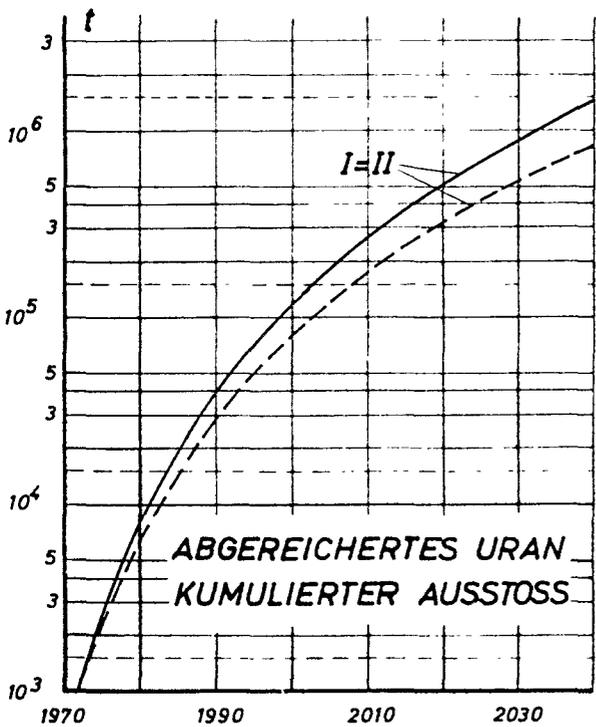
—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE " "	II	GLEICHBLEIBENDER " "



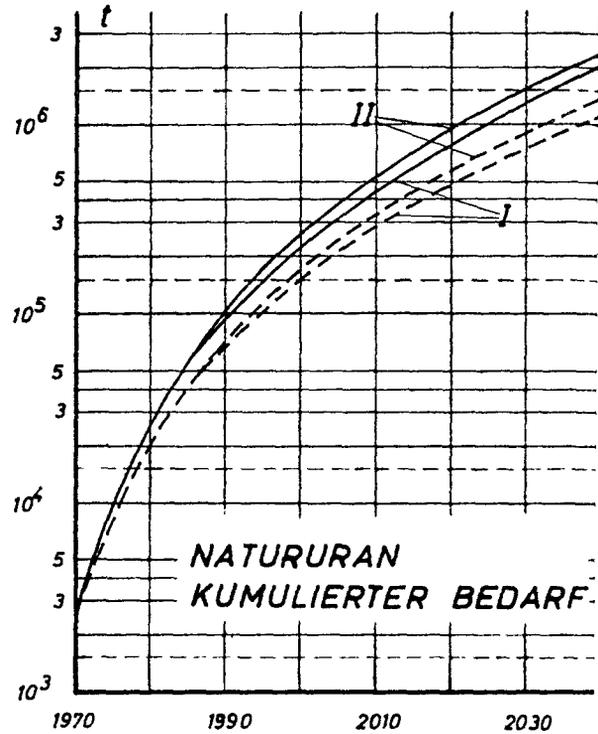
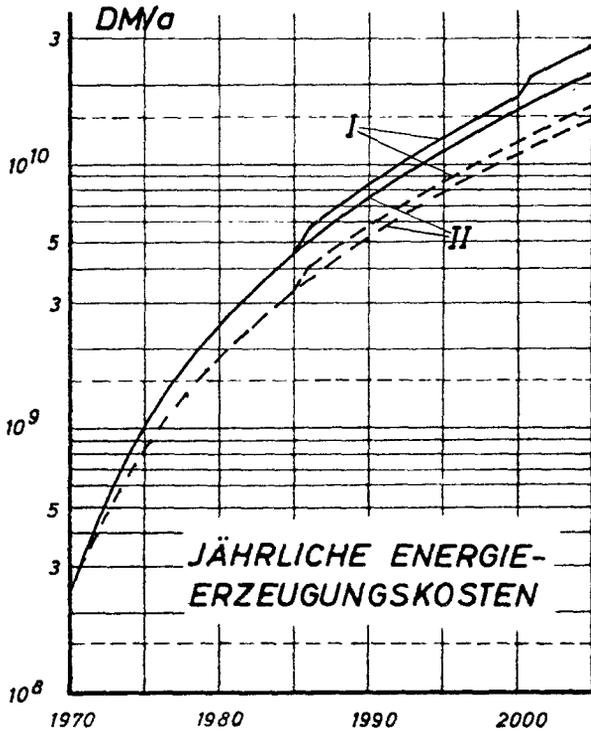
EINTYPENSTRATEGIE  $D_2O_{(SSW)}$



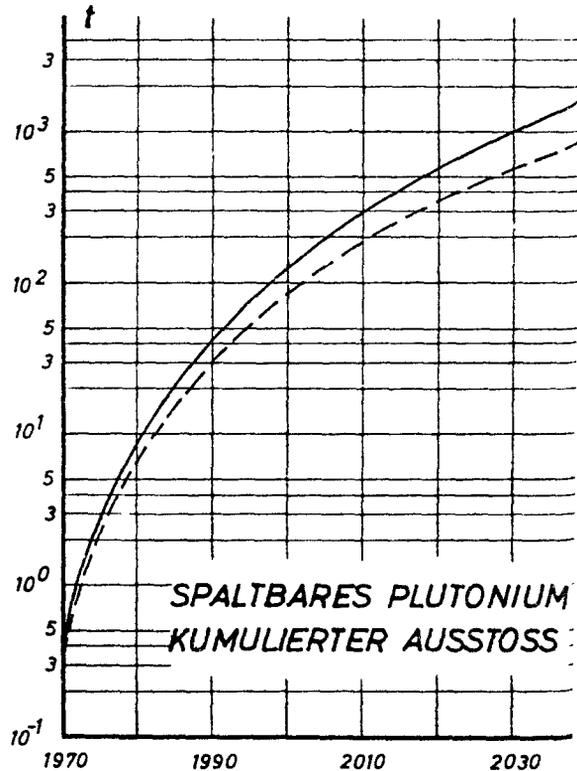
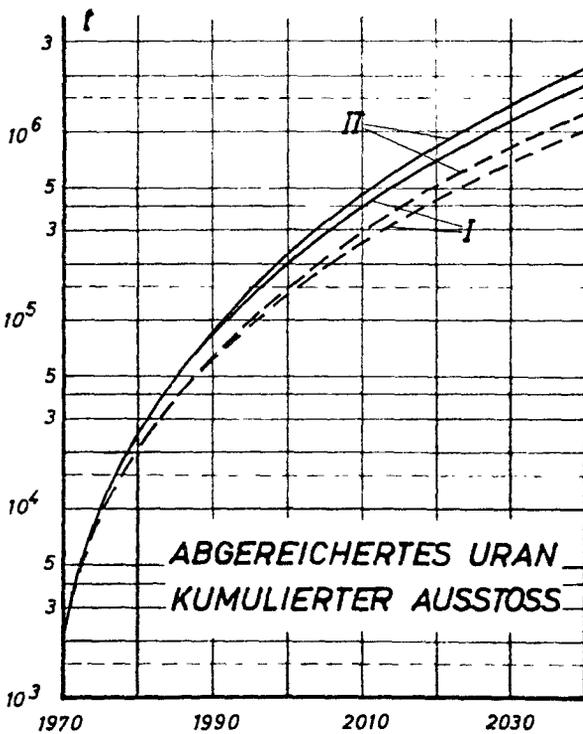
—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE " "	II	GLEICHBLEIBENDER " "



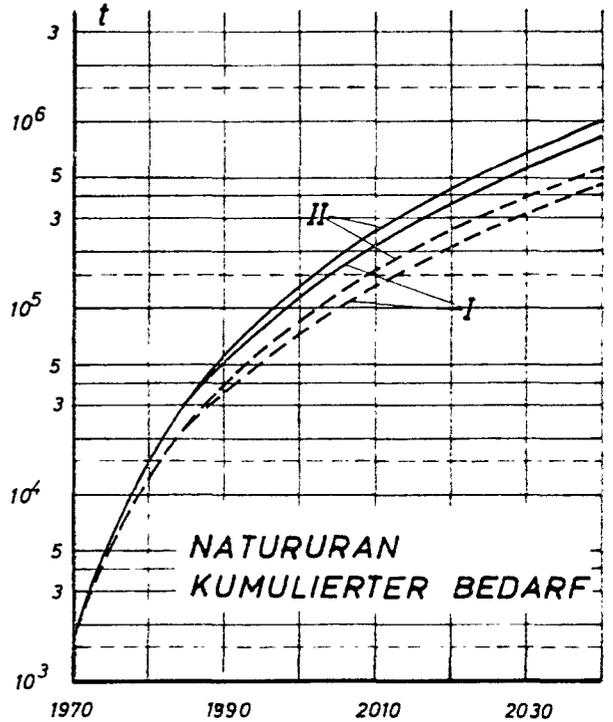
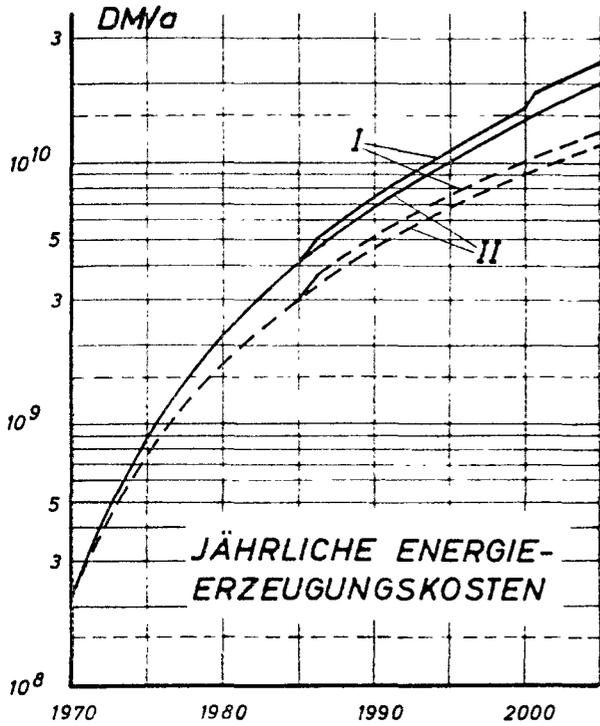
EINTYPENSTRATEGIE **AGR(UKAEA)**



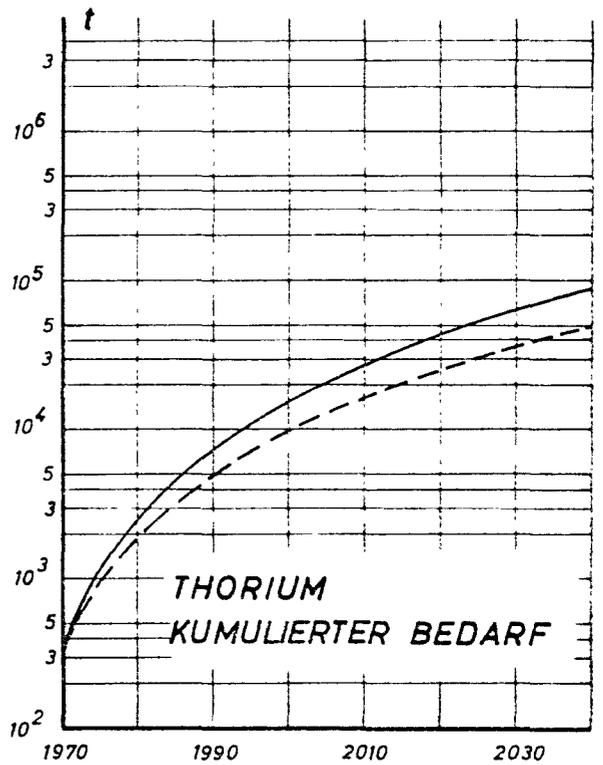
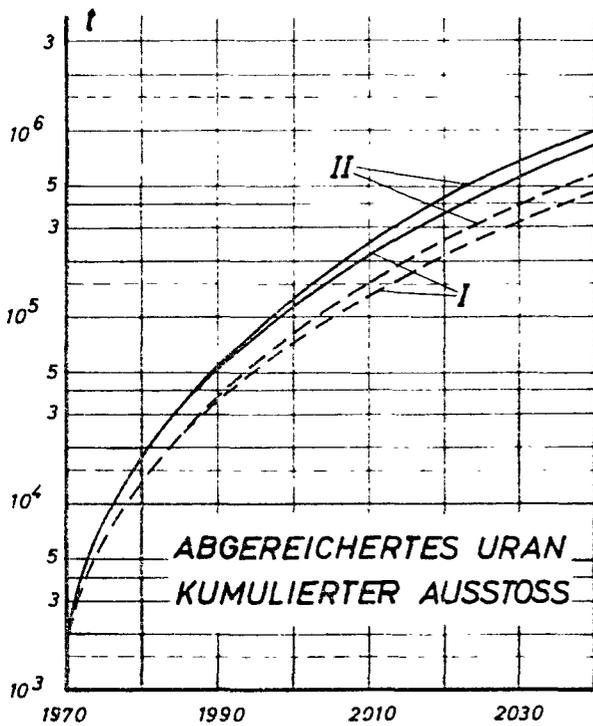
—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE " "	II	GLEICHBLEIBENDER " "



# EINTYPENSTRATEGIE THTR(GA)

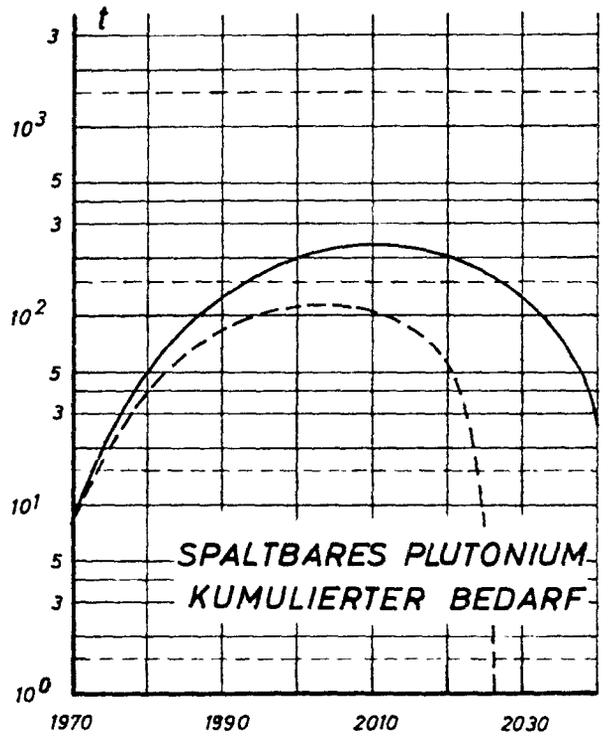
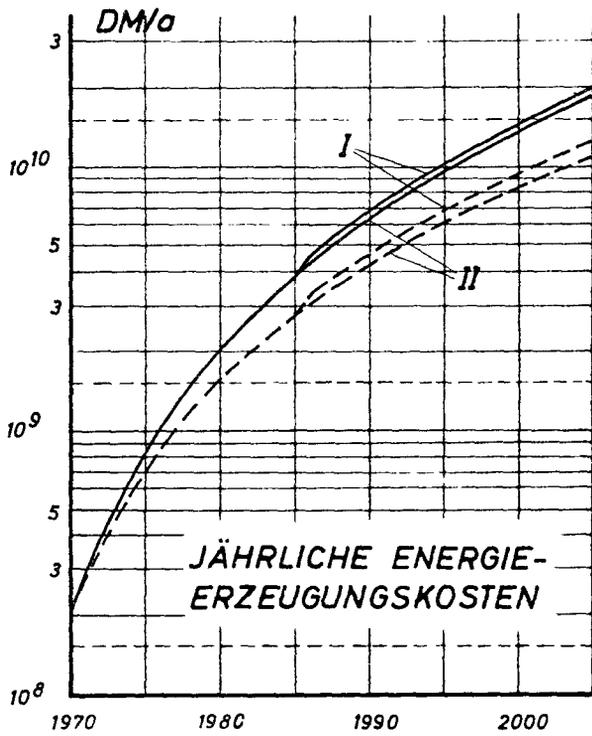


—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE " "	II	GLEICHBLEIBENDER " "

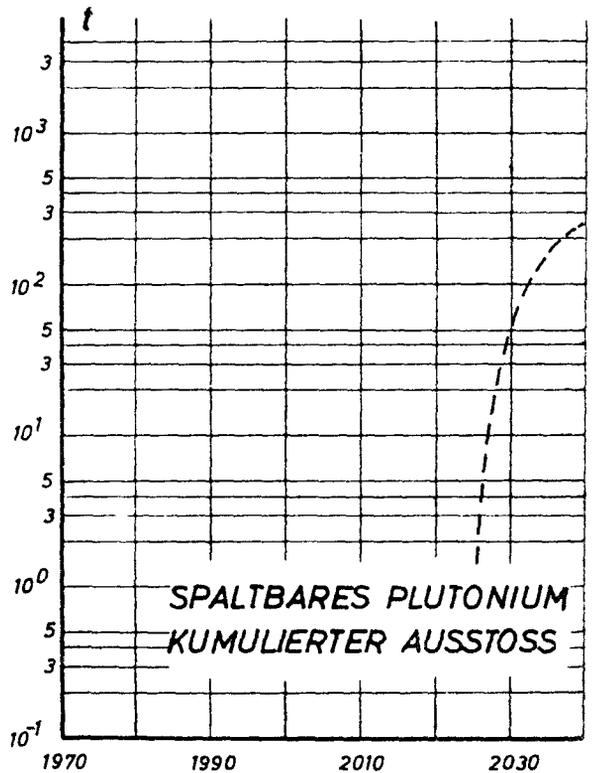
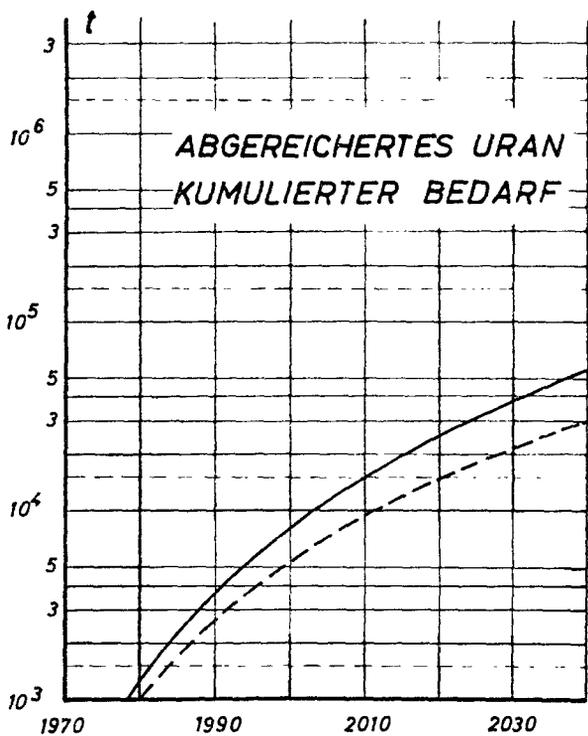


EINTYPENSTRATEGIE

**Na-BR(GE)**

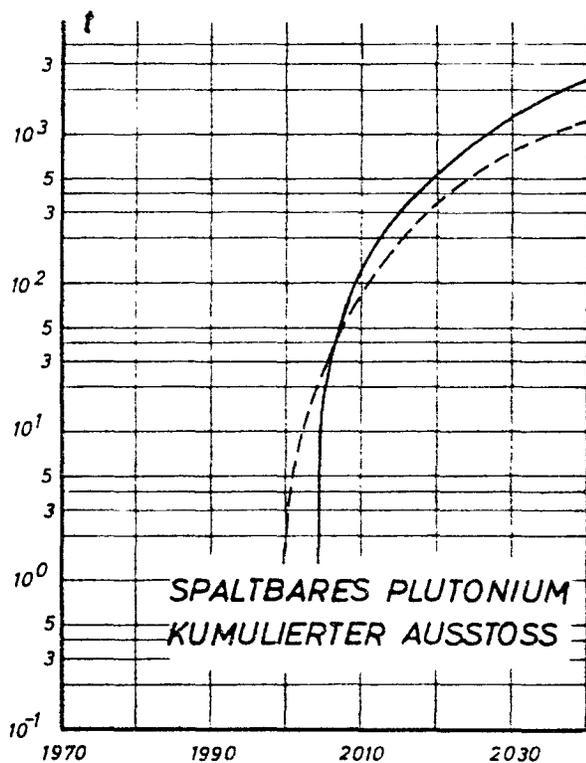
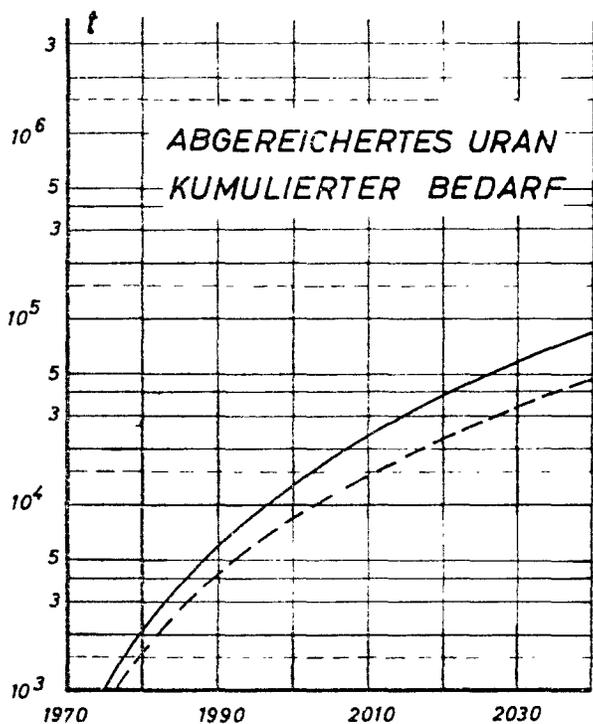
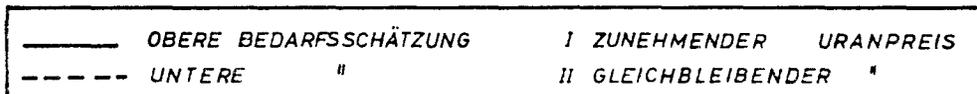
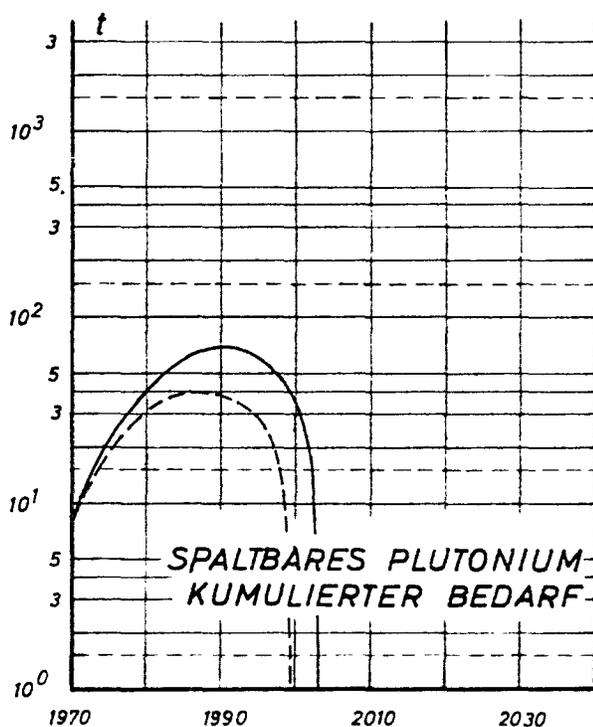
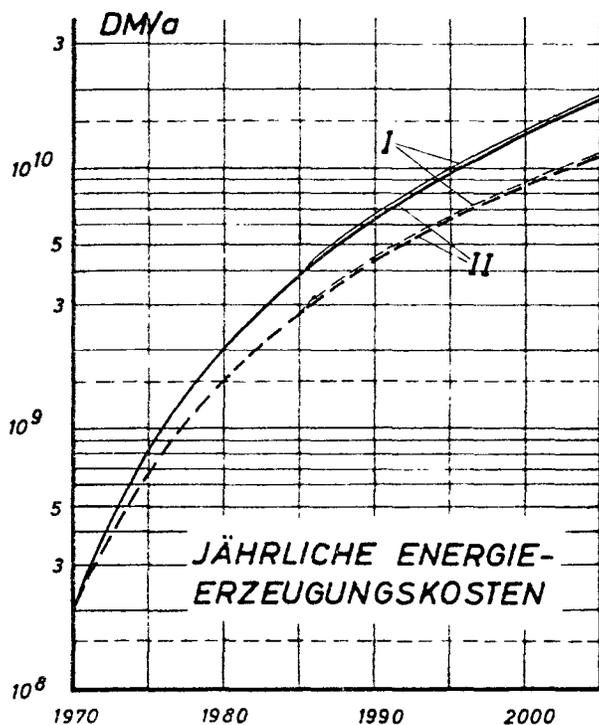


—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE " "	II	GLEICHBLEIBENDER " "



EINTYPENSTRATEGIE

Na1-BR(KFK)



## 6. Erläuterungen zu den Zweitypen-Strategien

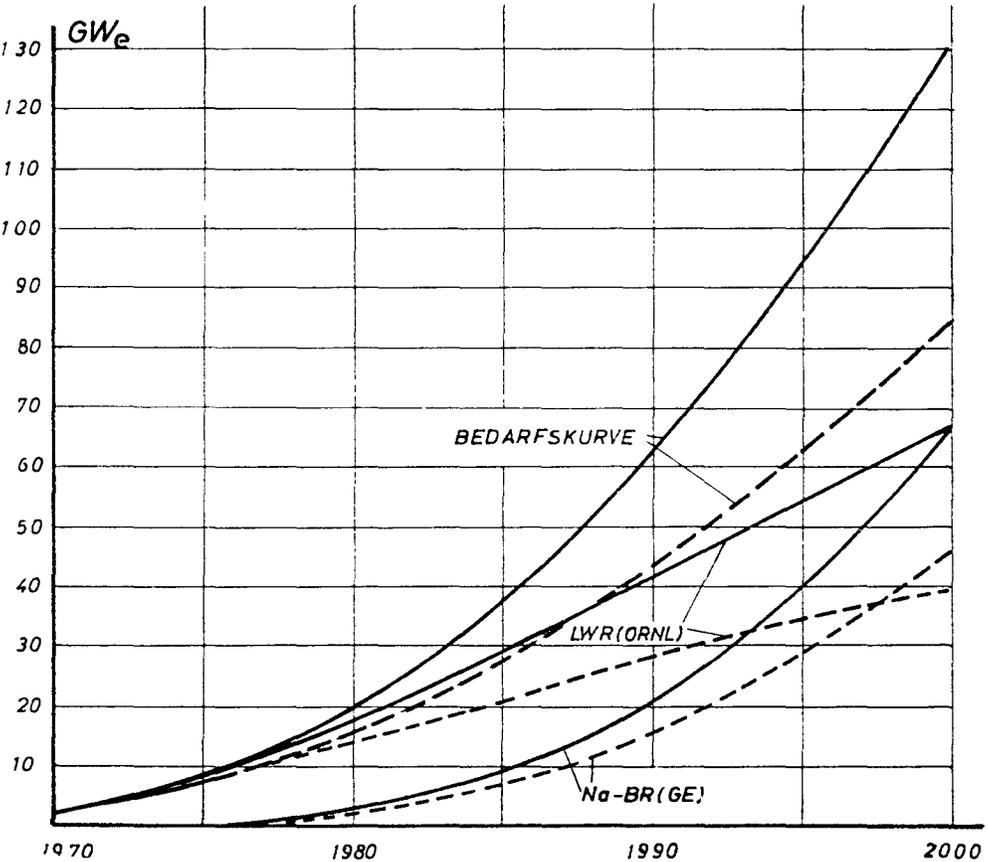
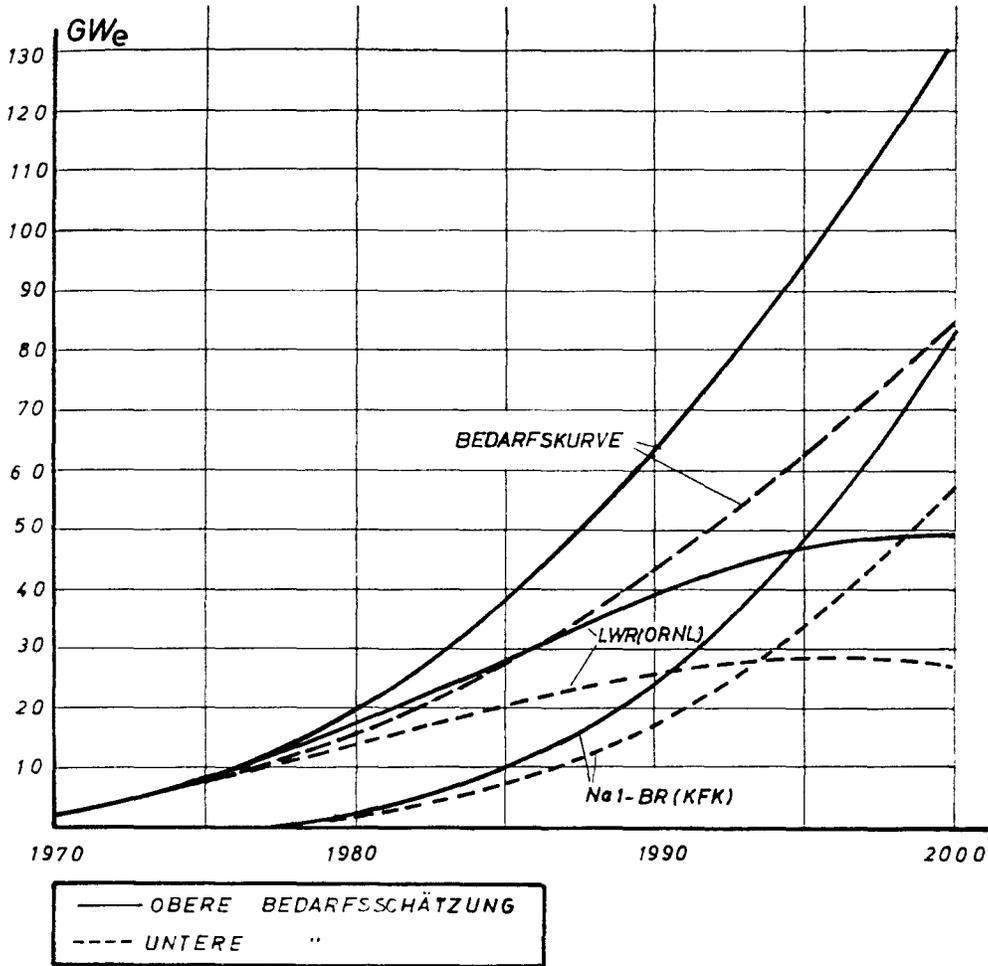
Wie schon erwähnt, kann das Wachstum einer Brüterpopulation mit dem einer Konverterpopulation gekoppelt werden. Dies geschieht in der Zweitypen-Strategie durch zwei Bedingungen. Erstens werden Reaktoren nur entsprechend der Energiebedarfskurve zugebaut. Zweitens ist der neu hinzukommende Reaktor dann ein schneller Brüter, wenn sich genügend Plutonium aus den Konvertern und den schon bestehenden Brütern angesammelt hat. Dazu sei vermerkt, daß dem System zunächst 2 t Plutonium für Experimentierzwecke entzogen werden. Mit Hilfe dieses Verfahrens ergaben sich für die vier Konverter LWR (ORNL), LWR (SSW), D<sub>2</sub>O (SSW), GG(CEA) jeweils kombiniert mit den Brütern Na-BR (GE) und Na-1-BR (KFK) Kurven der Leistungsanteile, von denen aus sich die jährlichen Energieerzeugungskosten und der Kernbrennstoffbedarf errechnen ließen.

Die Ergebnisse sind für jeden Konvertertyp in drei aufeinander folgenden Abbildungen dargestellt. Auf der ersten ist oben die Kombination mit Na-1-BR (KFK), der eine hohe Bruterate (1,38) besitzt, und zum Vergleich unten die Kombination Na-BR (GE) mit kleinerer Bruterate (1,25) eingetragen. Die unterbrochenen Kurven entsprechen der unteren Bedarfskurve, die durchgezogenen der oberen. Da es sich hier immer um 1000 MWe-Anlagen handelt, kann die Anzahl der zu einem bestimmten Zeitpunkt in Betrieb stehenden Kraftwerke unmittelbar abgelesen werden. Eine Kurve gilt dem Brüter, die andere dem Konverter; beide zusammen ergeben die Bedarfskurve.

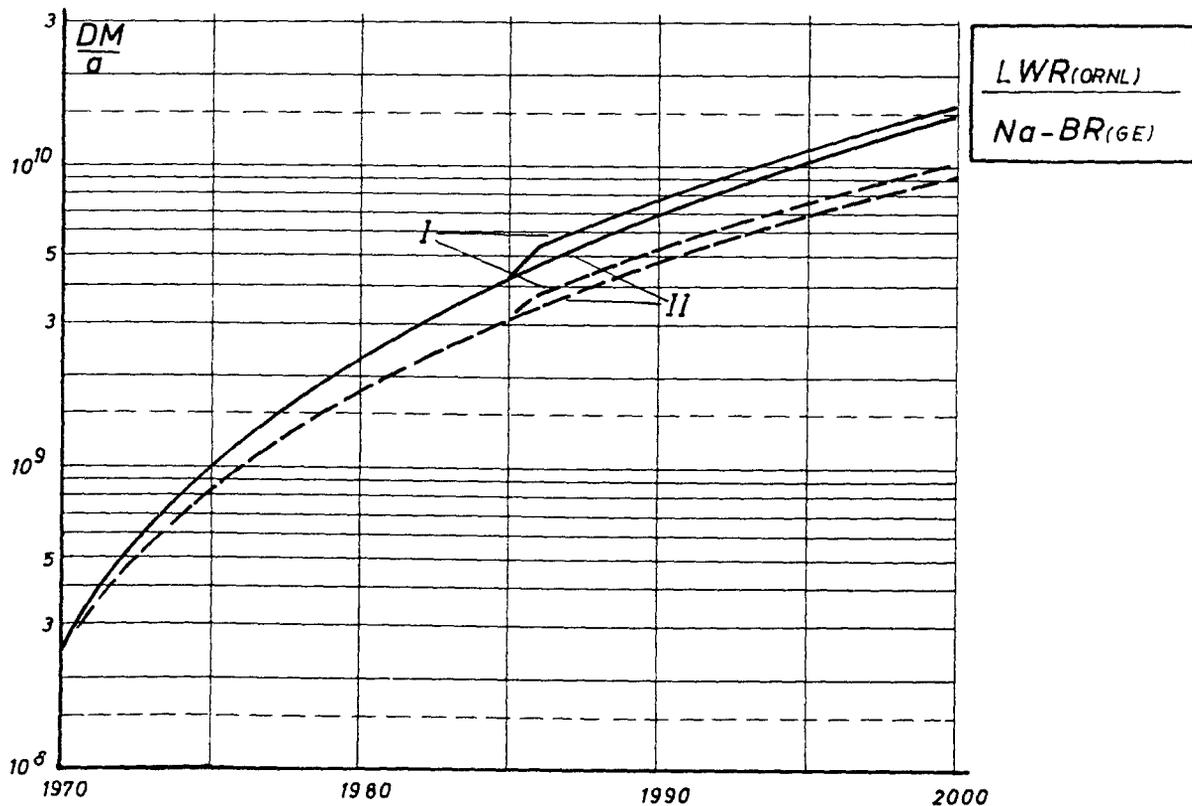
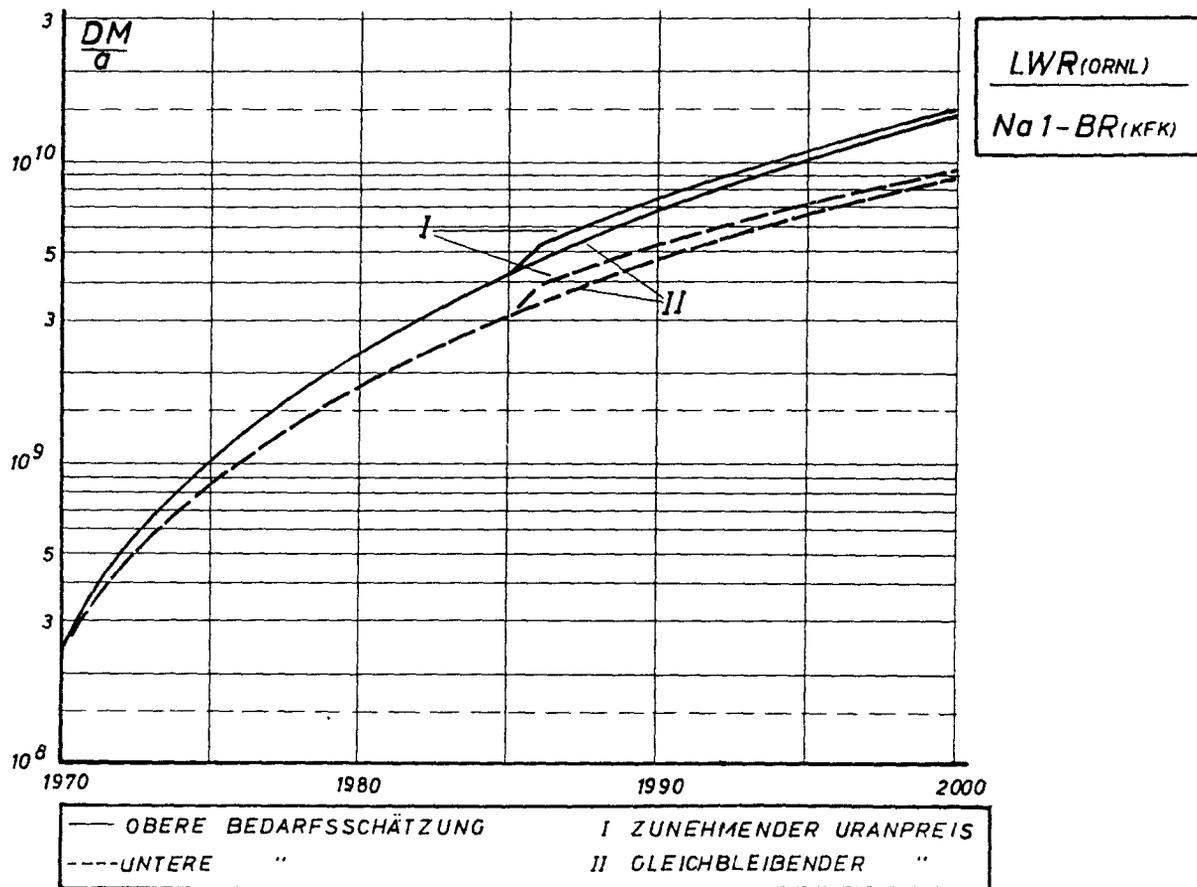
Die jeweils zweite Abbildung gibt für beide Bedarfskurven und die entsprechenden Reaktor-Kombinationen die jährlichen Energieerzeugungskosten an, die sich ab 1985 aufspalten und bei ansteigendem Uran-Preis höher liegen.

Die jeweils dritte Abbildung gibt am Beispiel der Kombination mit Na-1-BR (KFK) den Verbrauch an Natururan bei einer Zweitypen-Strategie sowie das anfallende Abfall-Uran an; hier ist berücksichtigt, daß der schnelle Brüter Abfall-Uran verbraucht. Bei den Kombinationen mit den beiden Leichtwasserreaktoren spalten sich die Bedarfskurven auf, wobei die untere durch das sich senkende Abreicherungs-niveau in der Diffusionsanlage zustande kommt, wenn der Uran-Preis steigt.

ANTEILE AN INSTALLIERTER NUKLEARER LEISTUNG  
IN EINER GEBUNDENEN ZWEITYPEN-STRATEGIE

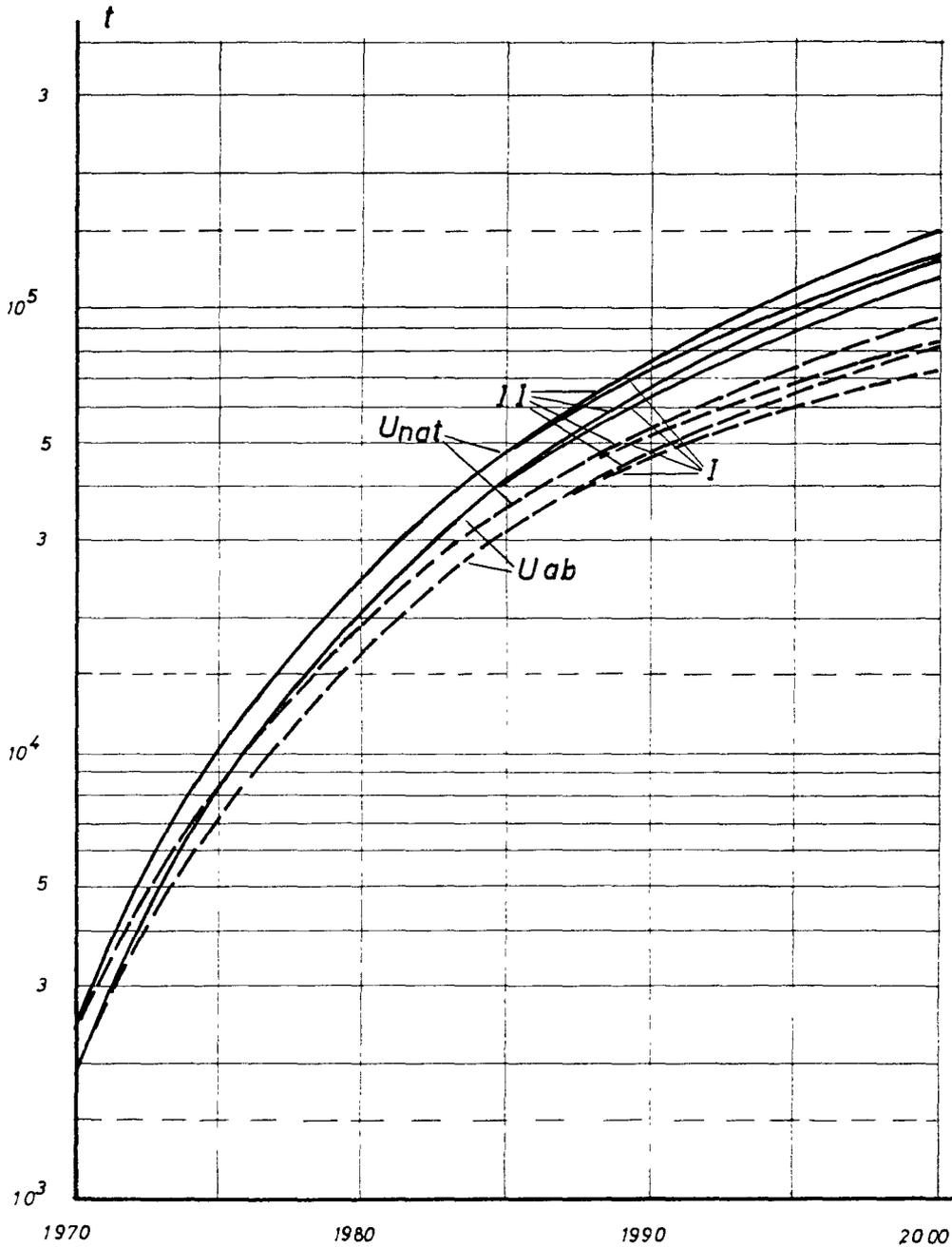


# JÄHRLICHE ENERGIEERZEUGUNGSKOSTEN



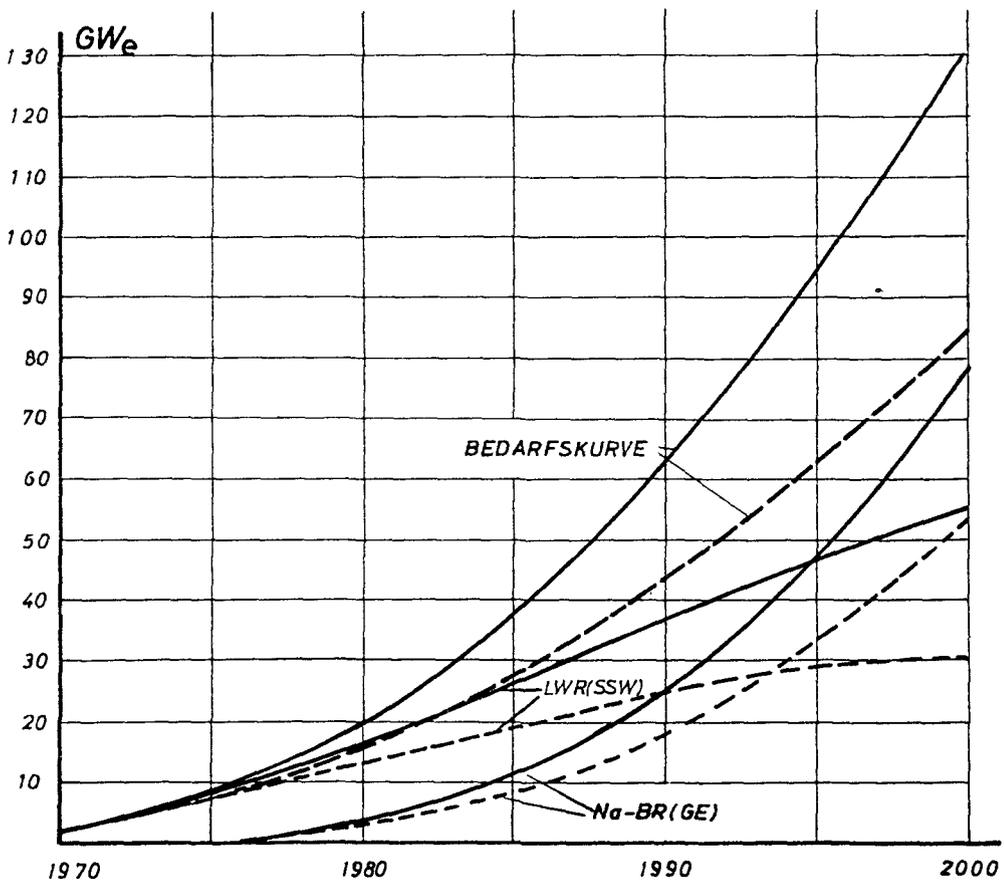
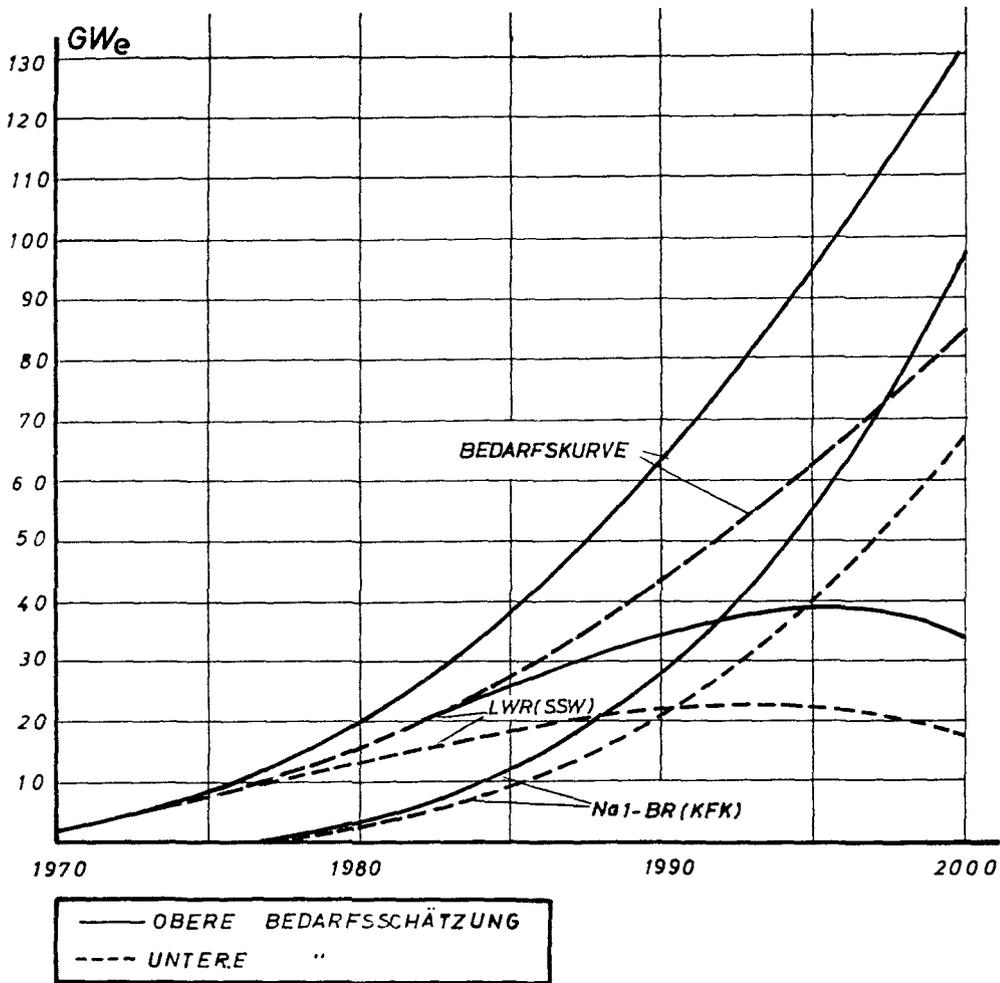
NATURURAN KUMULIERTER BEDARF  
ABGEREICHERTES URAN KUMULIERTER AUSSTOSS

$LWR_{(ORNL)}$
$Na1-BR_{(KFK)}$

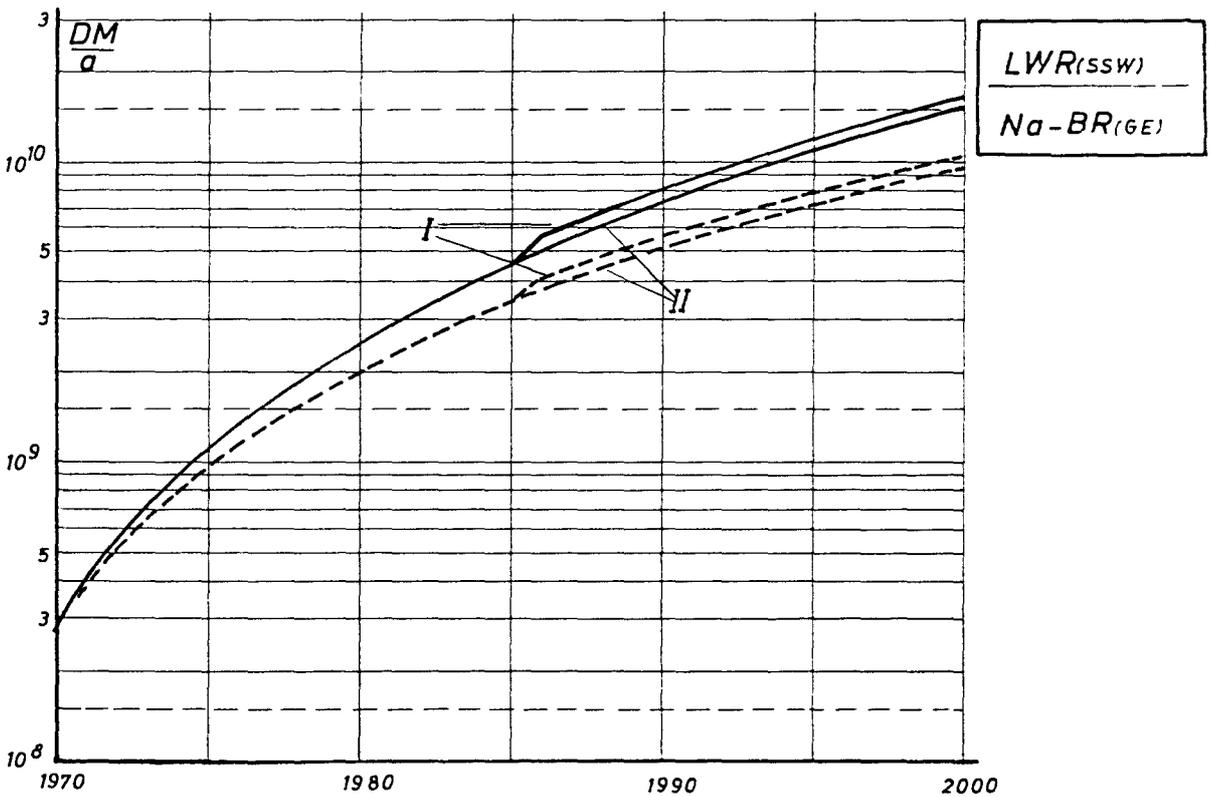
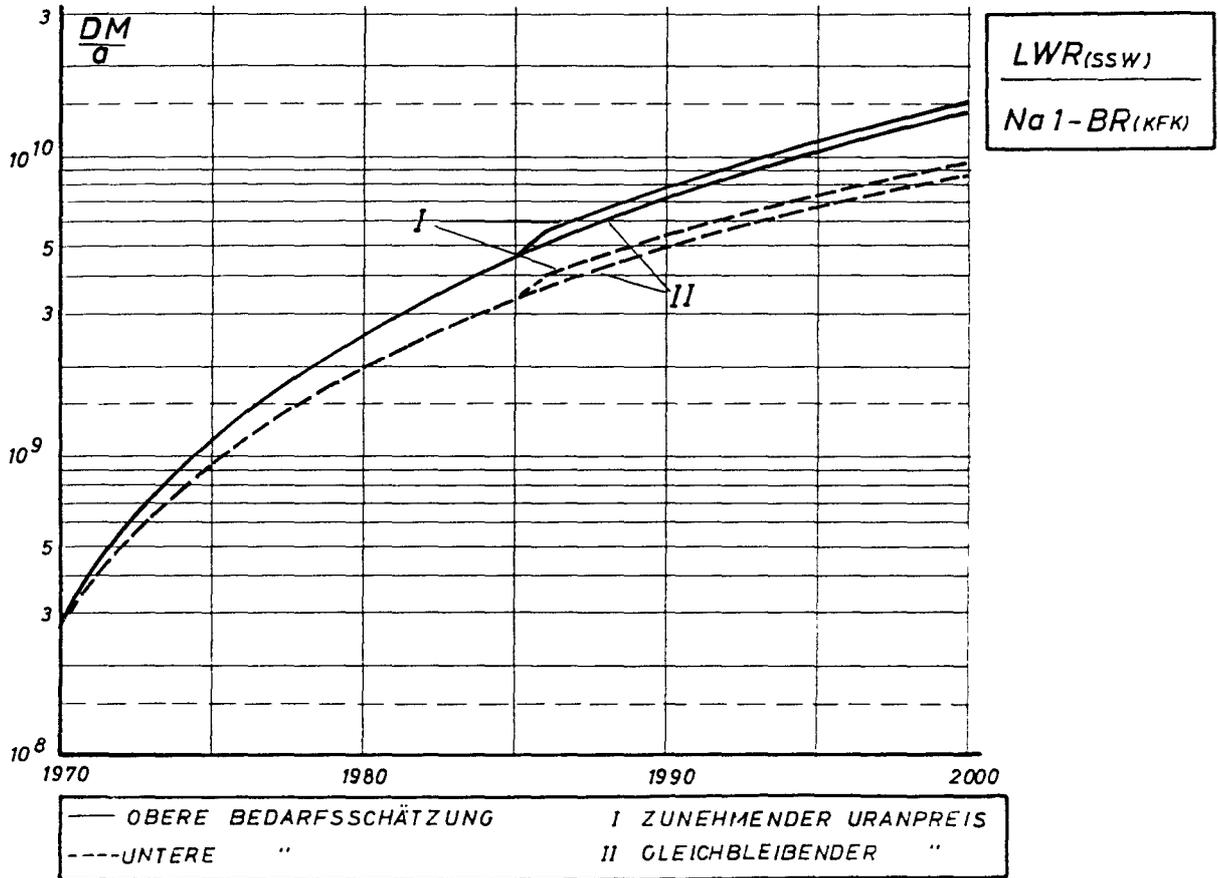


—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE	II	GLEICHBLEIBENDER

ANTEILE AN INSTALLIERTER NUKLEARER LEISTUNG  
IN EINER GEBUNDENEN ZWEITYPEN-STRATEGIE

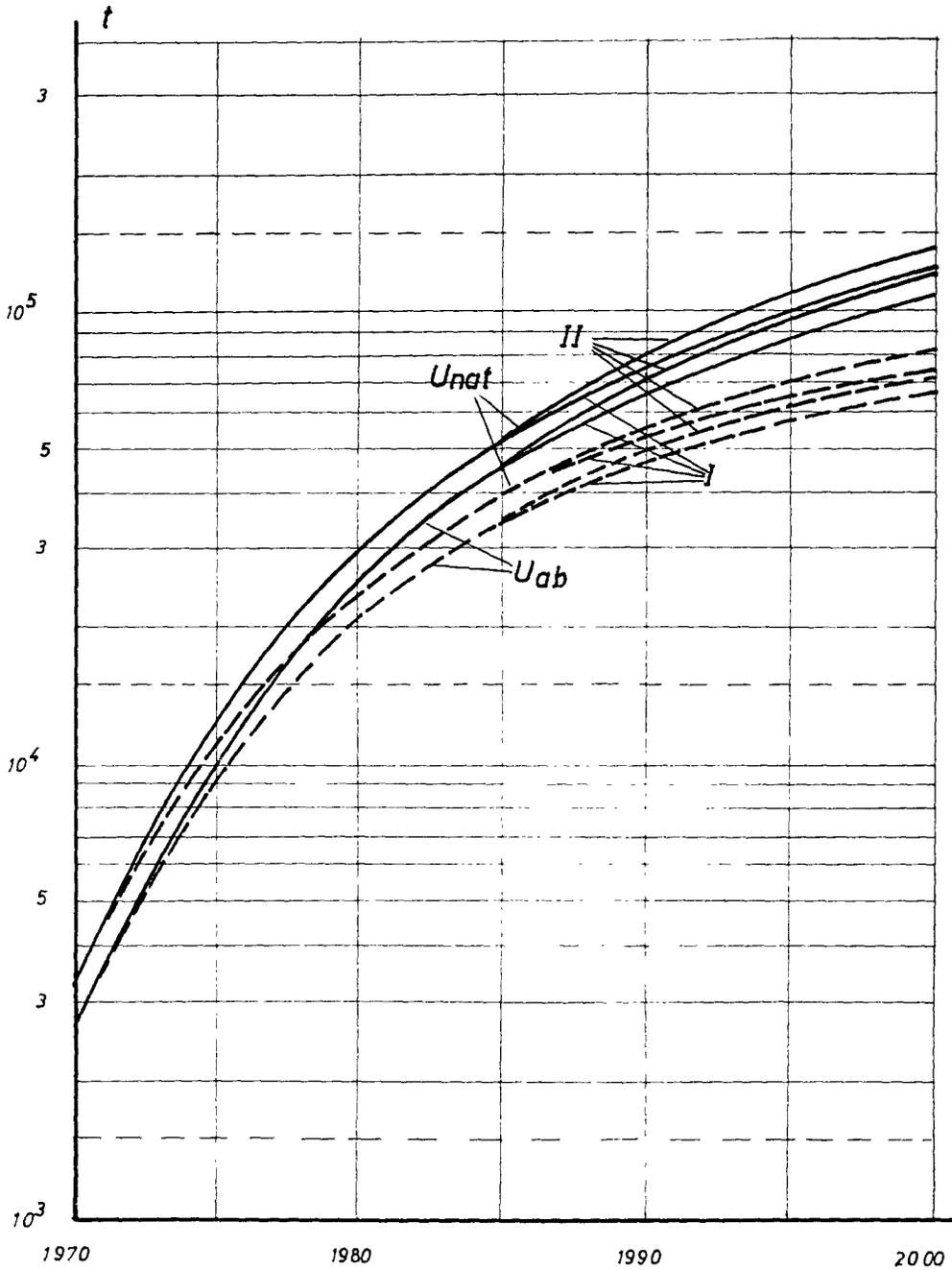


# JÄHRLICHE ENERGIEERZEUGUNGSKOSTEN



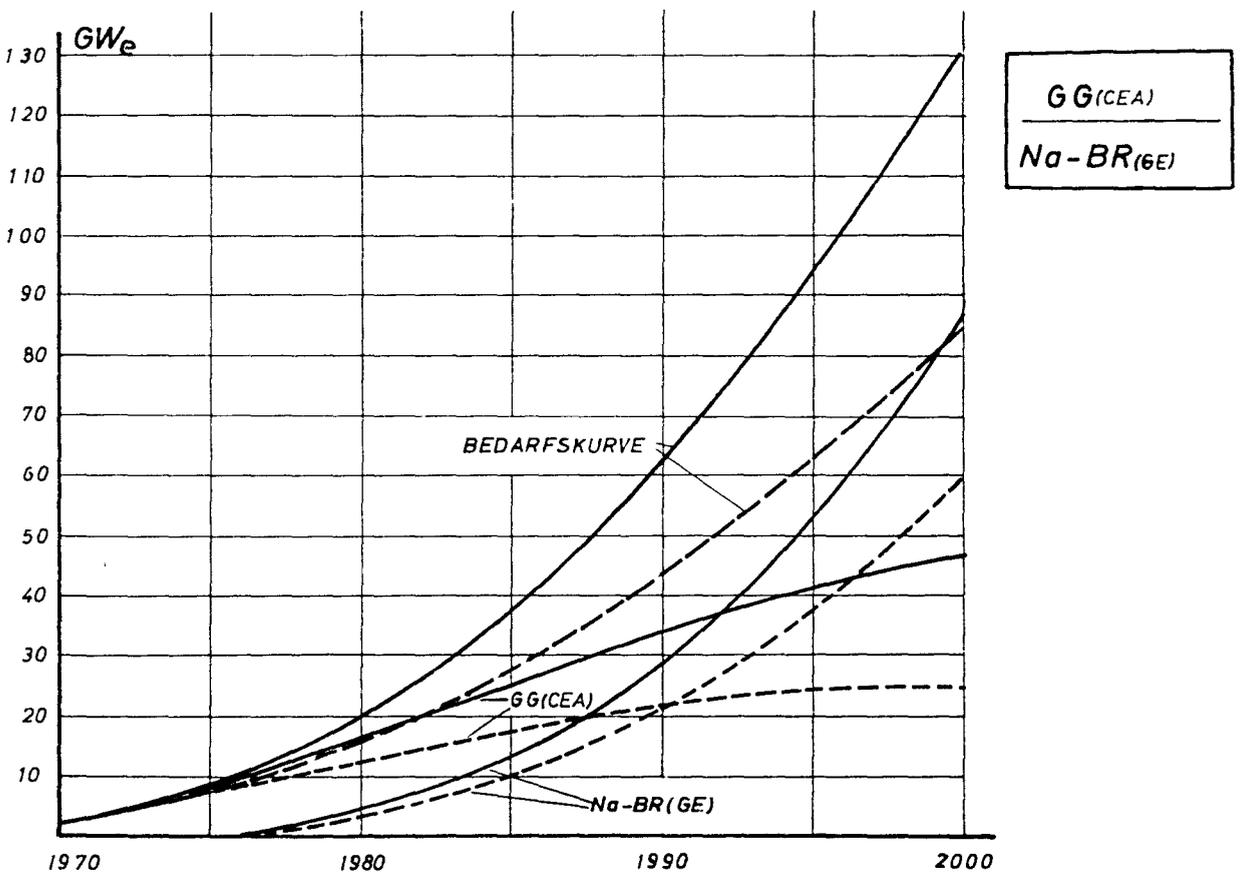
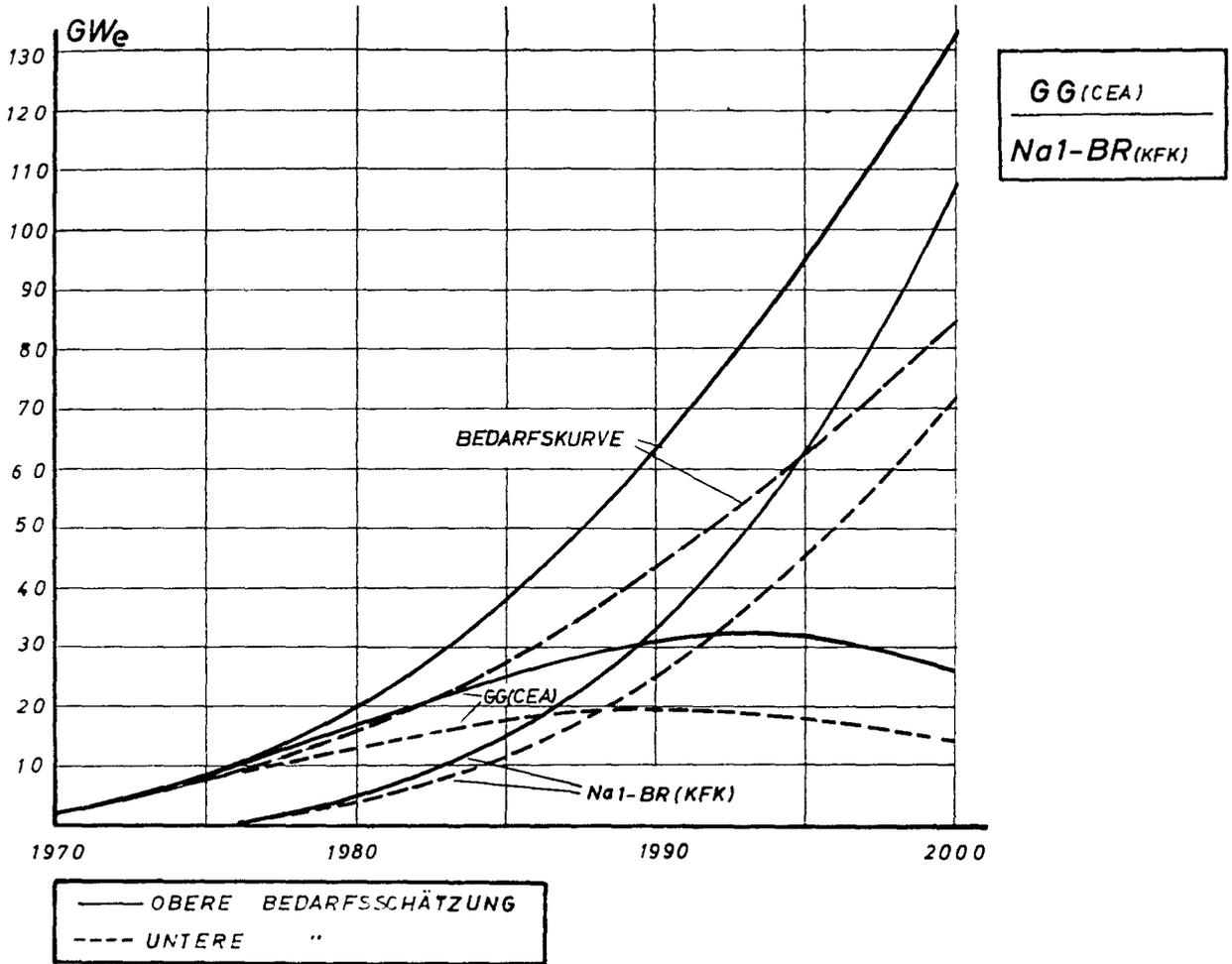
NATURURAN KUMULIERTER BEDARF  
ABGEREICHERTES URAN KUMULIERTER AUSSTOSS

$LWR_{(SSW)}$
$Na1-BR_{(KFK)}$

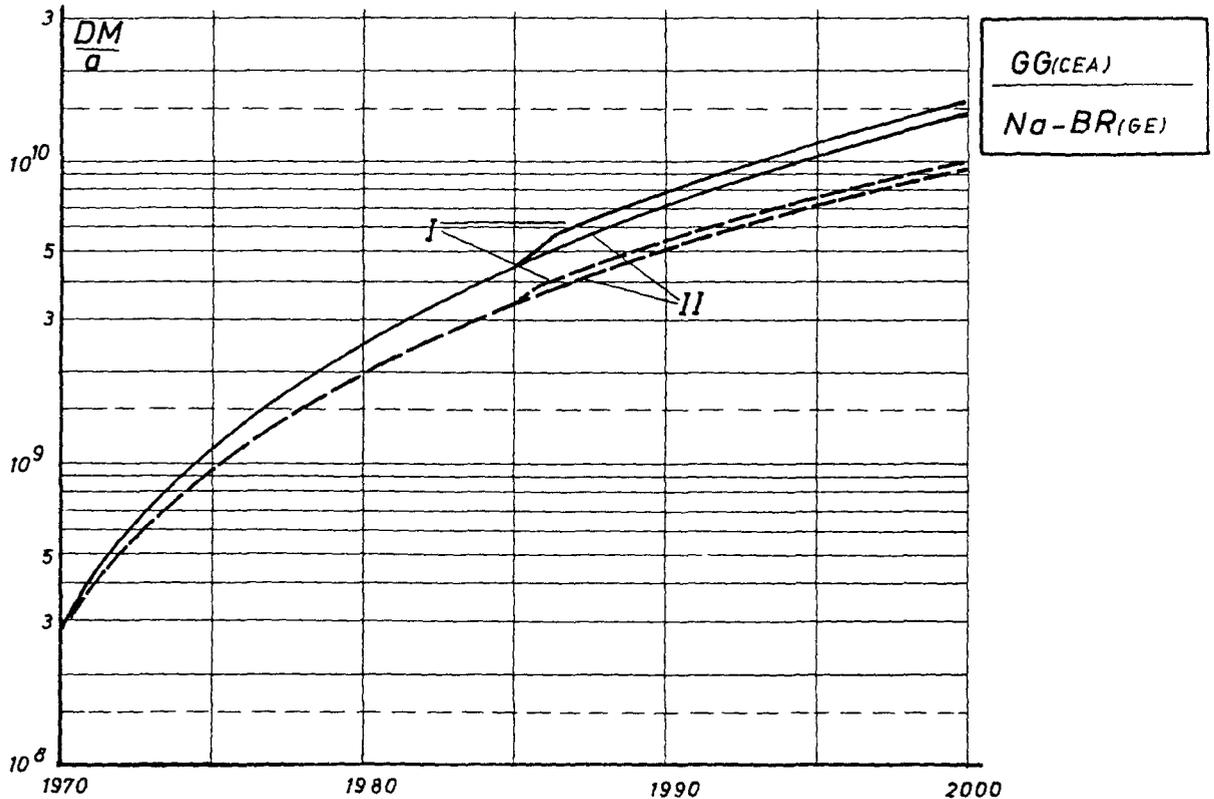
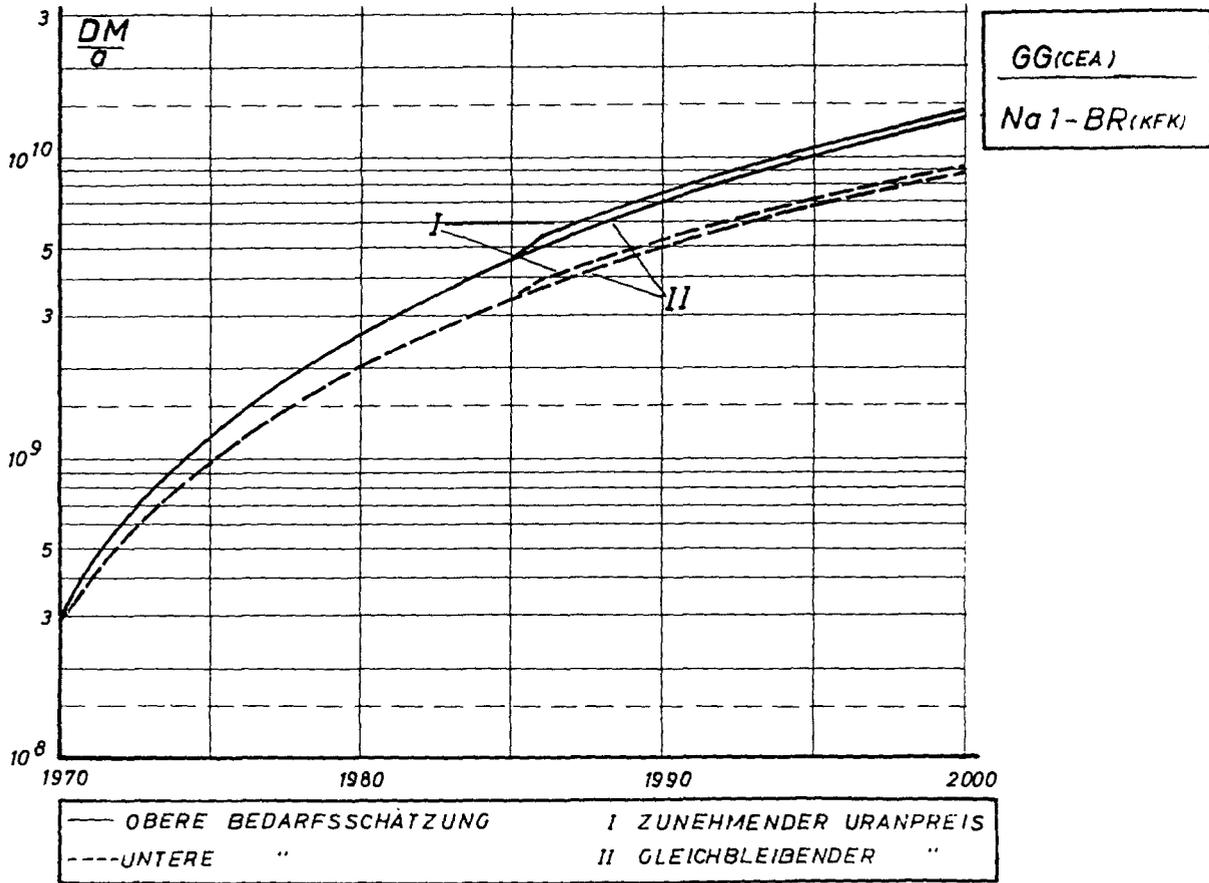


— ÜBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I ZUNEHMENDER URANPREIS
- - - UNTERE	II GLEICHBLEIBENDER

ANTEILE AN INSTALLIERTER NUKLEARER LEISTUNG  
IN EINER GEBUNDENEN ZWEITYPEN-STRATEGIE

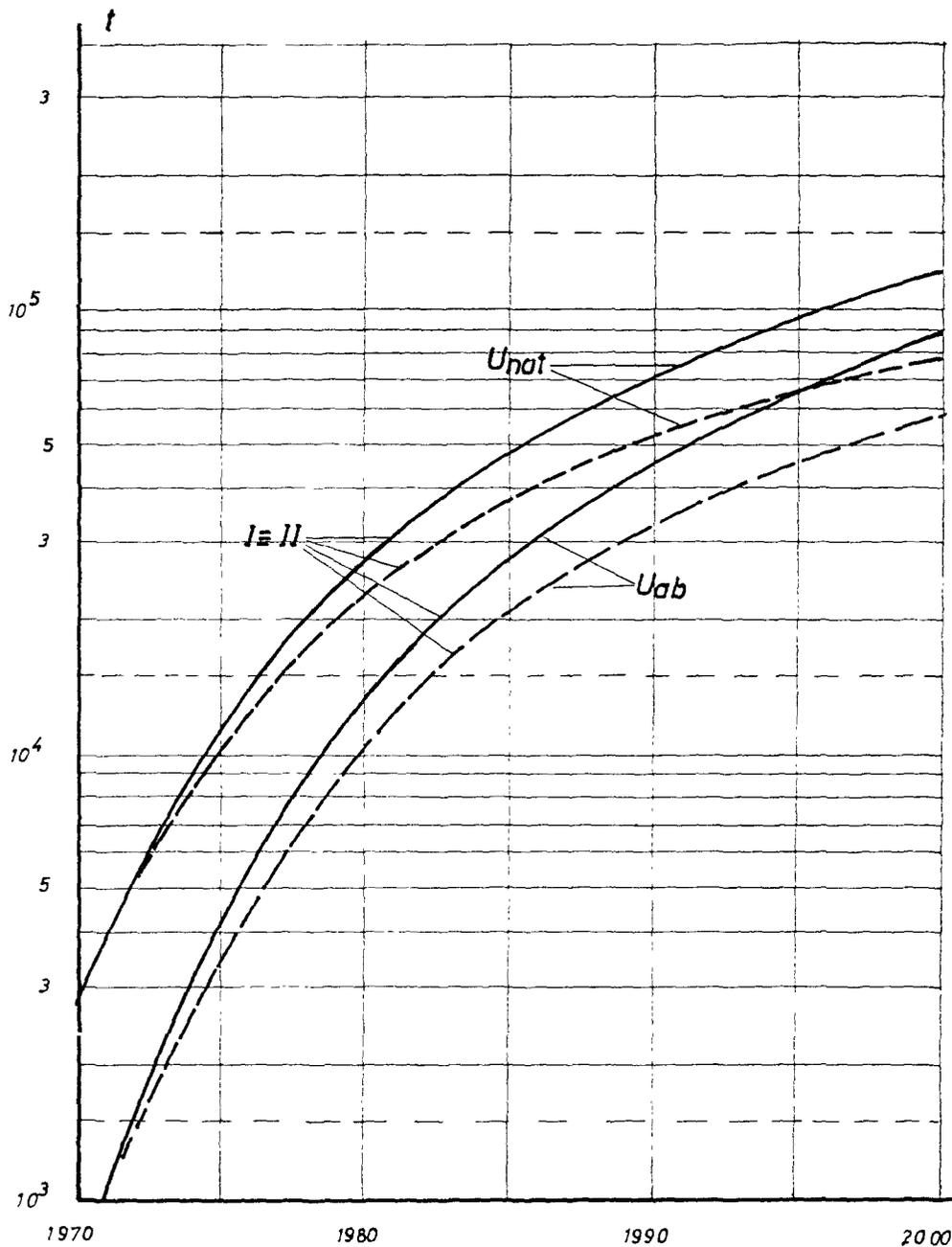


# JÄHRLICHE ENERGIEERZEUGUNGSKOSTEN



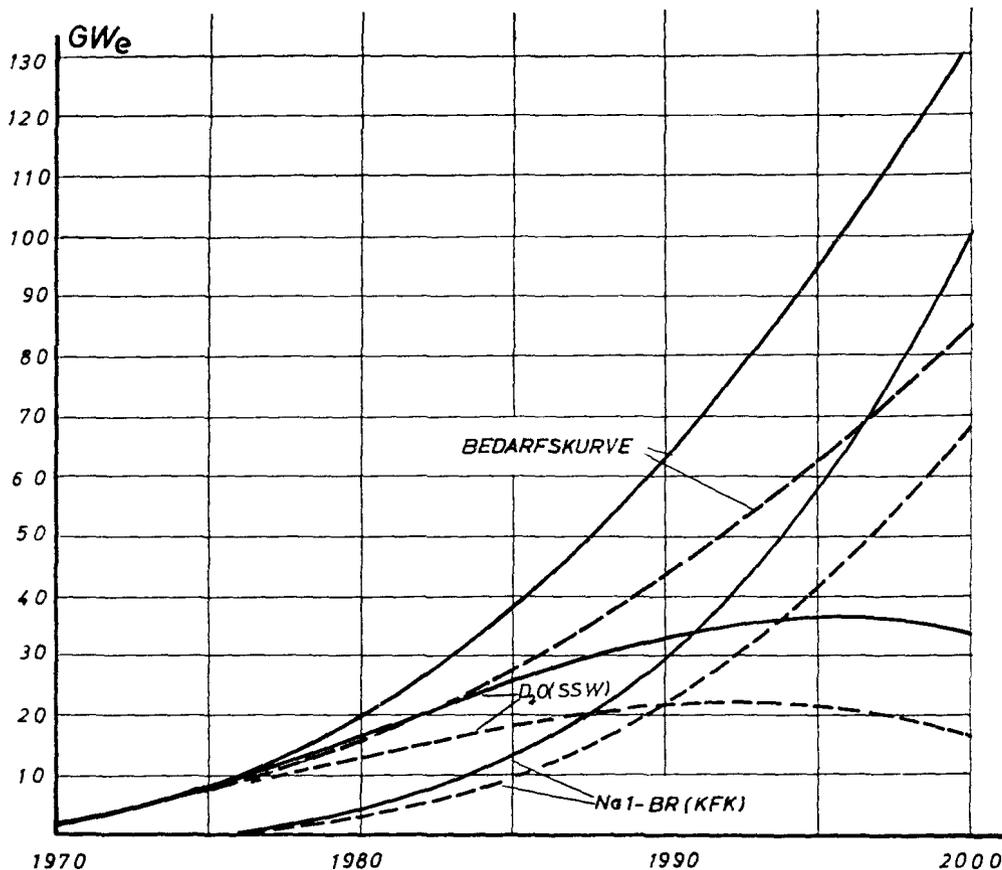
NATURURAN KUMULIERTER BEDARF  
ABGEREICHERTES URAN KUMULIERTER AUSSTOSS

GG(CEA)
Na1-BR(KFK)



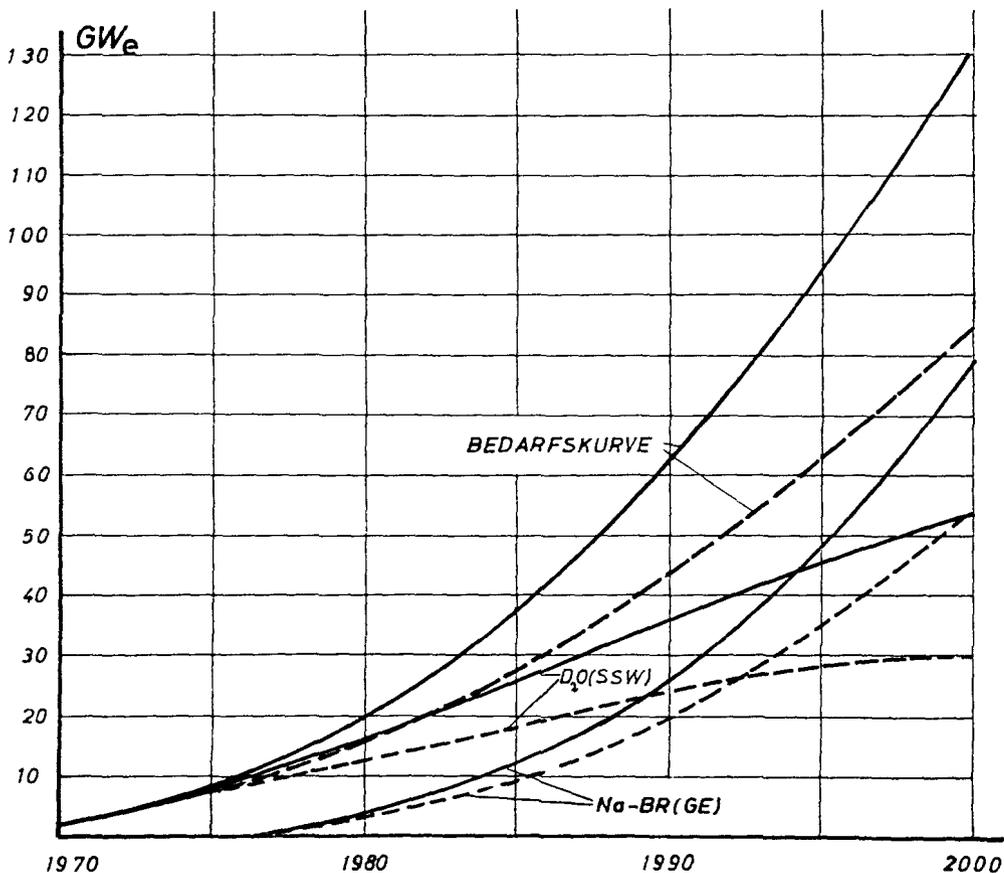
—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE	II	GLEICHBLEIBENDER

ANTEILE AN INSTALLIERTER NUKLEARER LEISTUNG  
IN EINER GEBUNDENEN ZWEITYPEN-STRATEGIE



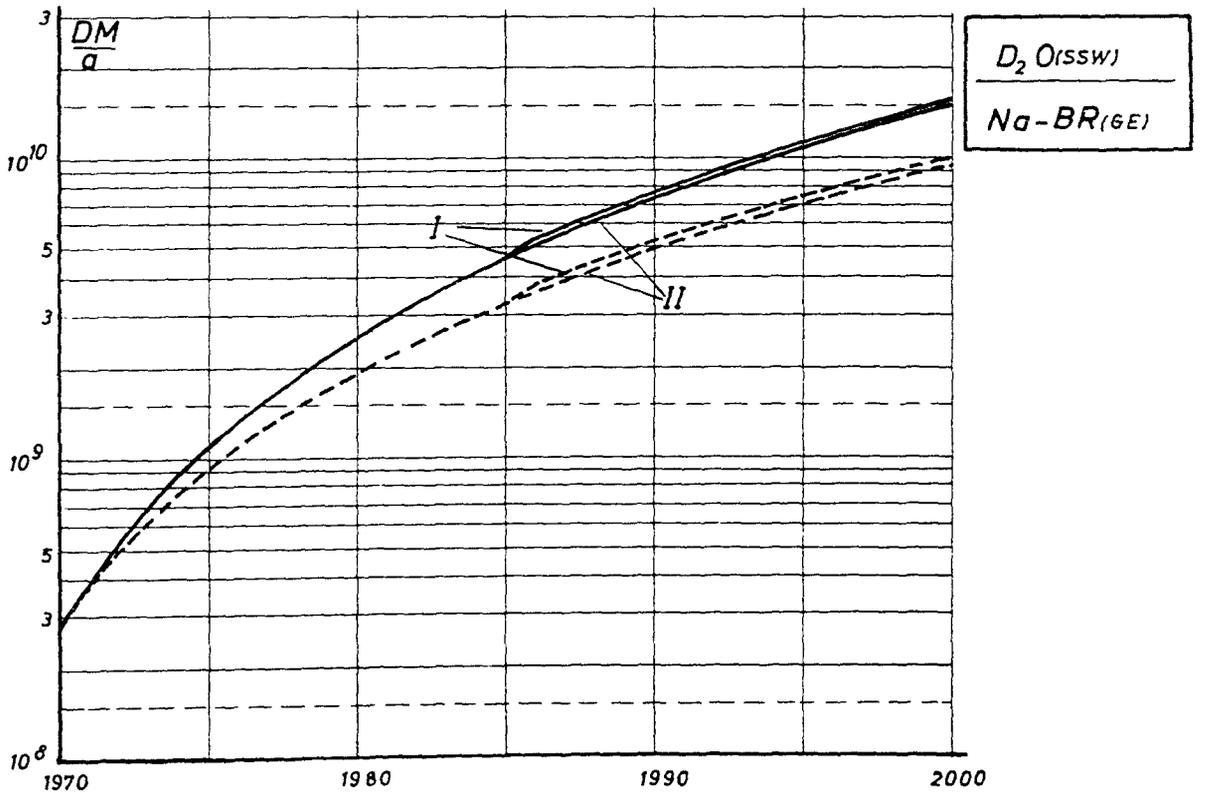
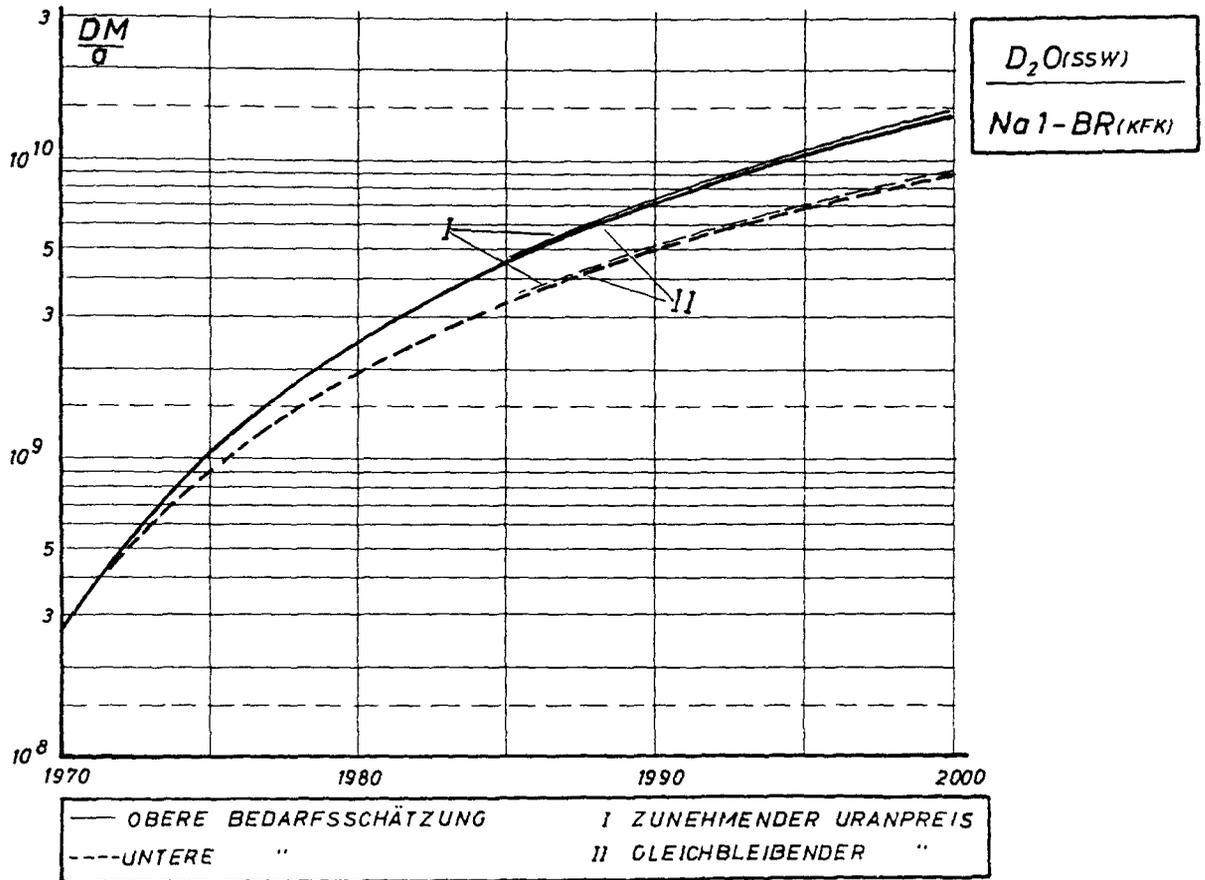
$D_2O(SSW)$
$Na1-BR(KFK)$

—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG
- - -	UNTERE "



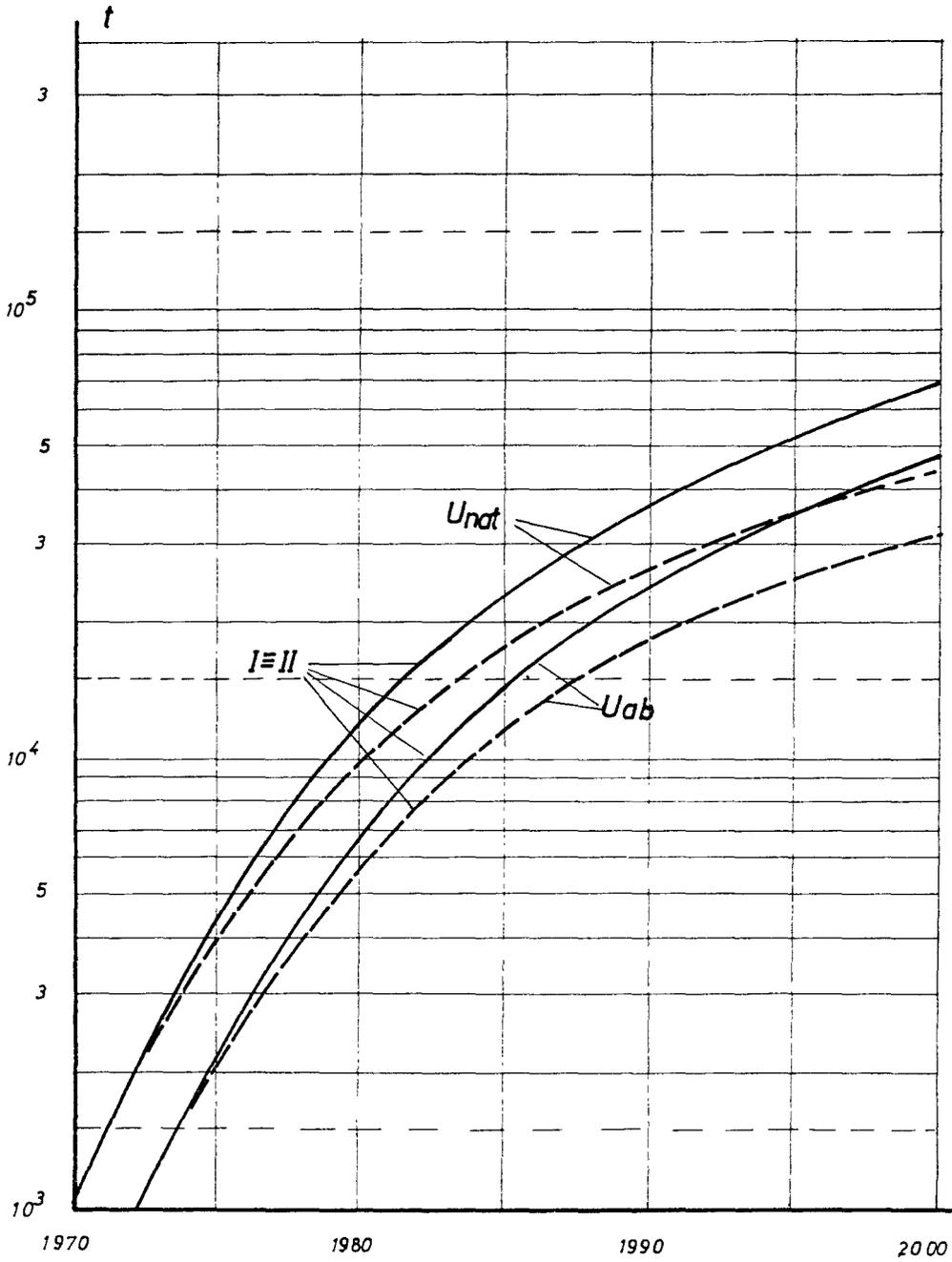
$D_2O(SSW)$
$Na-BR(GE)$

# JÄHRLICHE ENERGIEERZEUGUNGSKOSTEN



NATURURAN KUMULIERTER BEDARF  
ABGEREICHERTES URAN KUMULIERTER AUSSTOSS

$D_2O_{(SSW)}$
$Na1-BR_{(KFK)}$



—	OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG	I	ZUNEHMENDER URANPREIS
- - -	UNTERE	II	GLEICHBLEIBENDER

## 7. Erläuterungen zu den zusammenfassenden Darstellungen

Die folgenden Seiten und Tabellen bringen wichtige Kennziffern, die den zahlenmäßigen Auswertungen der Ein- und Zweitypen-Strategien entnommen sind. Die im Hinblick auf die begrenzten billigen Uranreserven maßgebende Größe ist der kumulative Uran-Verbrauch einer bestimmten Strategie.

Die Abbildung Seite 46 stellt diesen Verbrauch bis zum Jahre 2000 für Ein- und Zweitypen-Strategien für die obere und untere Bedarfskurve sowie für die Brennstoffkostenhypothesen I und II dar. Der stark herabgesetzte Uranverbrauch der Zweitypen-Strategien wird durch die Abbildung auf Seite 47 verdeutlicht, in der jeweils für das Jahr 2040 der Verbrauch einer Konverterpopulation und der Verbrauch einer Kombination der gleichen Konverter mit Na-1-Brütern einander gegenübergestellt sind.

Die zweite Kenngröße sind die Jahreskosten der Energieerzeugung im Jahre 2000 für die verschiedenen Strategien. Sie finden sich auf der Seite 48.

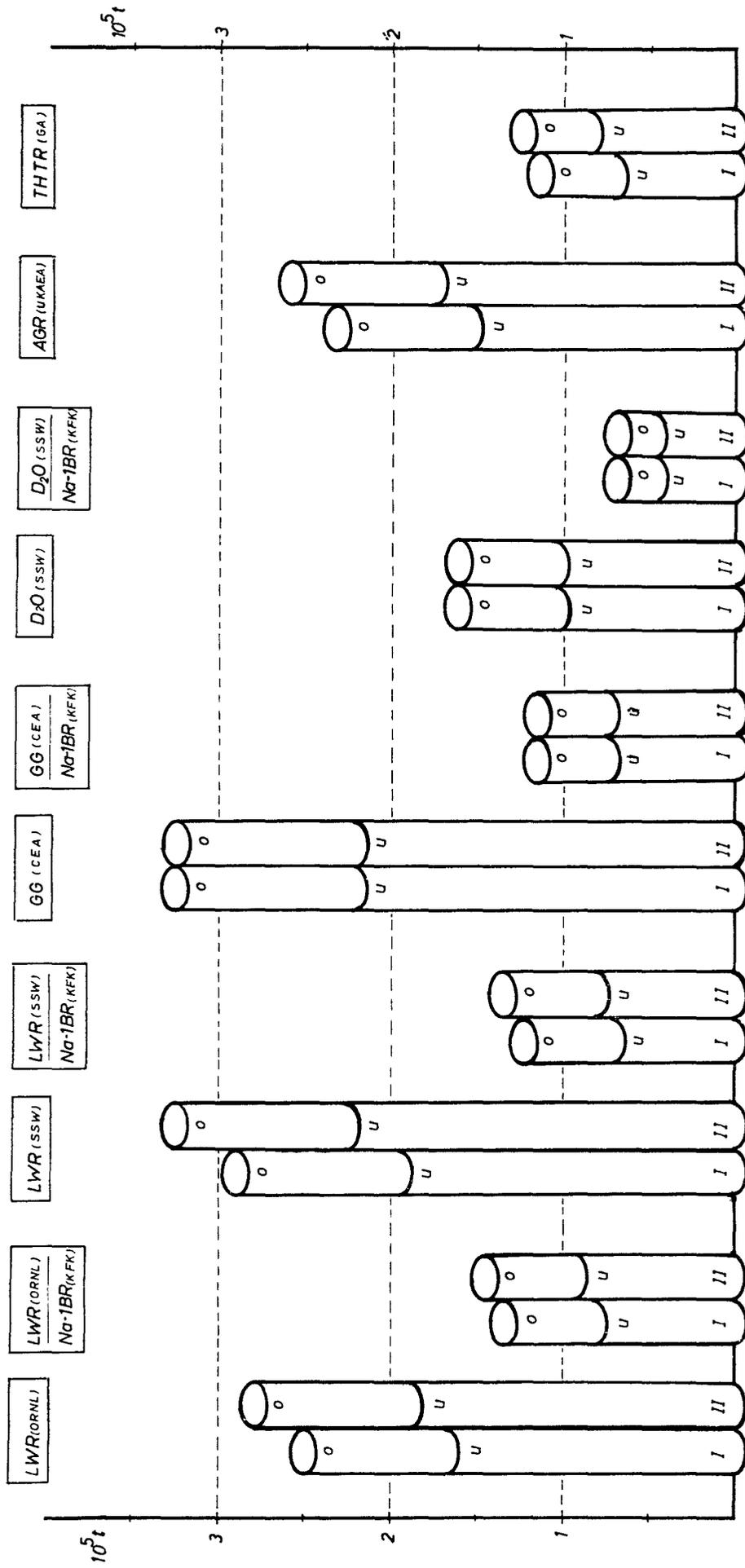
Schließlich ist noch die Kostensumme für die gesamte Energieerzeugung von 1970 - 2000, barwertmäßig umgelegt auf das Jahr 1970, eine besonders charakteristische Ziffer. Sie ist neben dem kumulativen Stoffbedarf und den Jahreskosten in Tabelle 6 für verschiedene Strategien wiedergegeben.

In Tabelle 7 finden sich für die Beispiele LWR (ORNL) und LWR (ORNL)/Na-1-BR (KFK) die jährlichen Energieerzeugungs-, Investitions-, Kapital-, Betriebs- und Brennstoffkosten für verschiedene Jahre.

Tabelle 8 gibt noch einmal die auf den Seiten 46 und 47 dargestellten kumulativen Natururanmengen zahlenmäßig wieder.

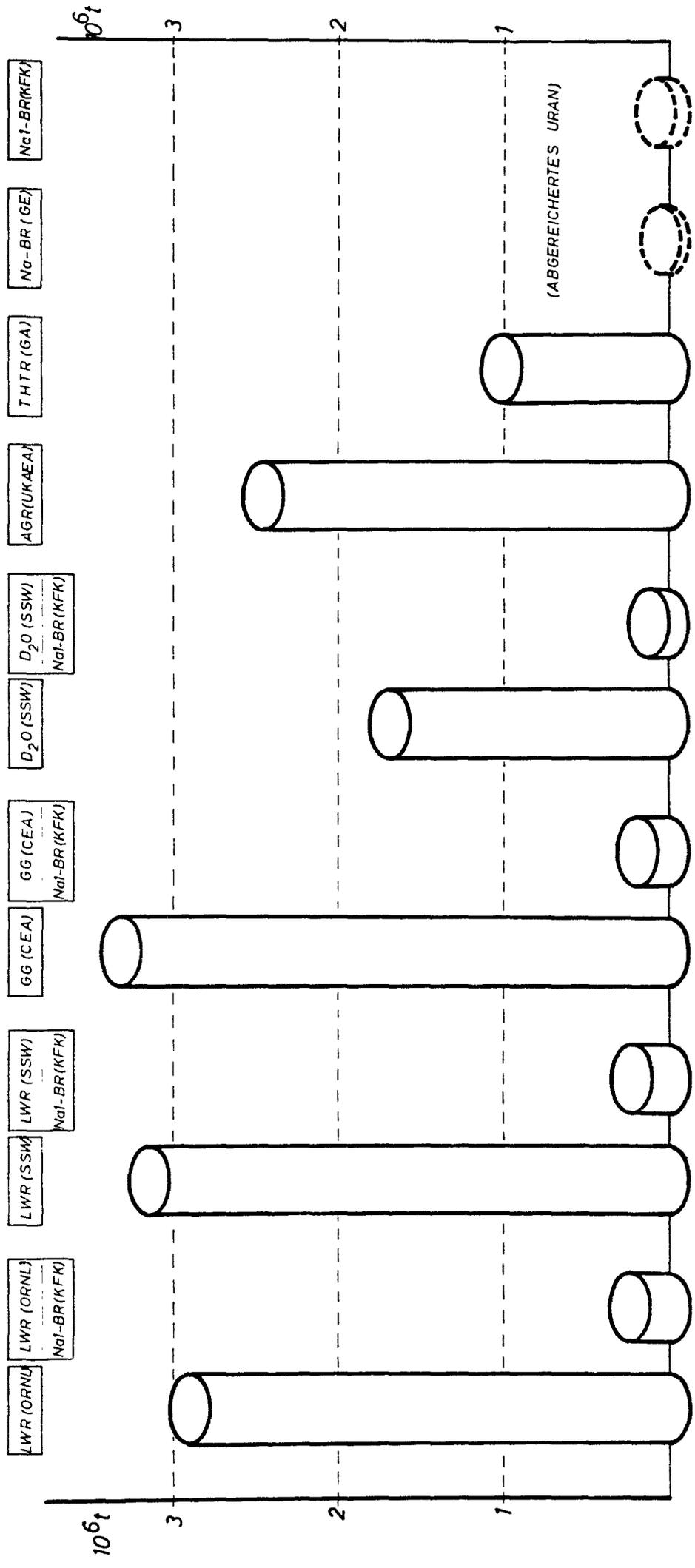
In der Tabelle 9 ist eine Schätzung des jährlichen Durchsatzes durch die Aufarbeitungsanlagen zusammengestellt. Man erkennt daraus die Abhängigkeit der aufzuarbeitenden Menge von den verschiedenen Ein- und Zweitypen-Strategien für die Jahre: 1975, 1980, 1990 und 2000.

KUMULIERTER NATURANBEDARF IN DER EIN- UND ZWEITYPEN-STRATEGIE BIS ZUM JAHRE 2000

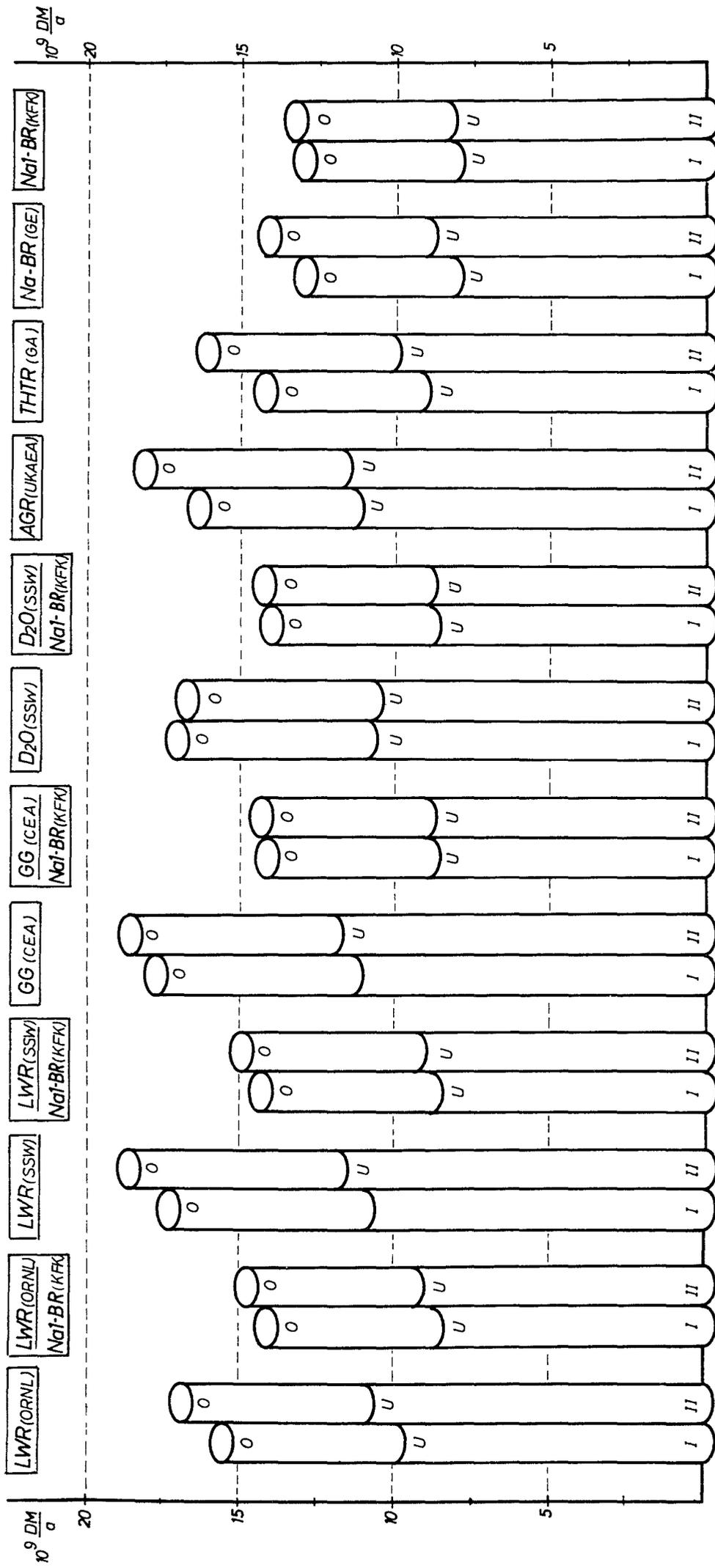


o = OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG  
 u = UNTERE  
 I ZUNEHMENDER URANPREIS  
 II GLEICHBLEIBENDER URANPREIS

KUMULIERTER NATURURANBEDARF IN DER EIN- UND ZWEITYPEN-STRATEGIE BEI GLEICHBLEIBENDEN URANKOSTEN FÜR DIE OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG BIS ZUM JAHRE 2040



JÄHRLICHE ENERGIEERZEUGUNGSKOSTEN IN DER EIN- UND ZWEITYPENSTRATEGIE IM JAHERE 2000



O = OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG  
 U = UNTERE "

I = GLEICHBLEIBENDER URANPREIS  
 II = ZUNEHMENDER "

VERGLEICH VON EIN- UND ZWEITYPENSTRATEGIEN IM JAHRE 2000

Tabell e 6

(URANKOSTEN ZUNEHMEND; OBERE BEDARFSSCHÄTZUNG)

	LWR (ORNL)	LWR (SSW)	GG (CEA)	D <sub>2</sub> O (SSW)	AGR (UKAEA)	THTR (GA)	Na·BR (GE)	Na1-BR (KFK)
KUM. NATURURANBEDARF 1000 t	248	290	327	168	232	114	8.1	13.3
PLUTONIUMERZEUGUNG (THORIUMBEDARF)	227	298	377	310	132	(14900)	- 193	- 37.5
JAHRESKOSTEN	$\frac{GDM}{a}$	16.92	18.68	16.79	18.20	16.15	14.26	13.53
KOSTENSUMME (BARWERT)	GDM	44.09	49.29	45.20	47.16	41.96	37.22	35.60
KUM. NATURURANBED. 1000t	133	123	117	69				
JAHRESKOSTEN	$\frac{GDM}{a}$	14.74	14.86	14.28				
KOSTENSUMME (BARWERT)	GDM	41.01	43.23	41.25				
KUM. NATURURANBED. 1000t	146	140	144	76				
JAHRESKOSTEN	$\frac{GDM}{a}$	15.66	16.18	15.88				
KOSTENSUMME (BARWERT)	GDM	42.07	44.69	44.52				

ZWEITYPENSTRATEGIEN  
MIT Na-BR(CEA) MIT Na1-BR(KFK)

Tabelle 7

KOSTEN JE JAHR

( IN MILLIARDEN DM )

JAHR	GESAMTE ENERGIE- ERZEUGUNGSKOSTEN		INVESTITIONS- KOSTEN		KAPITALKOSTEN		BETRIEBSKOSTEN		BRENNSTOFF- KOSTEN	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1970	0.24	0.24	-	-	0.13	0.13	0.014	0.014	0.095	0.095
1975	1.0	1.0	0.95	0.95	0.52	0.52	0.063	0.063	0.39	0.39
1980	2.3	2.3	1.55	1.6	1.25	1.28	0.19	0.18	0.90	0.80
1990	8.0	6.4	2.6	2.8	3.9	4.1	0.46	0.47	3.6	1.9
2000	17	15	4.6	4.9	8.3	9.0	0.97	1.0	7.7	5.0

1 FÜR DIE EINTYPENSTRATEGIE MIT LWR (ORNL)

2 FÜR DIE ZWEITYPENSTRATEGIE MIT LWR (ORNL) / Na1-BR (KFK)

( KAPITAL-, BETRIEBS- UND BRENNSTOFFKOSTEN ZUSAMMEN ERGEBEN  
DIE ENERGIEERZEUGUNGSKOSTEN DER 1. SPALTE )

Tabell e 8

SCHÄTZUNG DES MAXIMALEN KUMULIERTEN NATURANBEDARFS  
 FÜR DIE BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND BEI EIN- BZW. ZWEI-  
 TYPENSTRATEGIEN BIS ZUM JAHRE 2000 BZW. 2040.

( IN 1000 t NATURAN )

	ALLEIN		MIT Na1-BRÜTER(KFK) BRUTRATE 1.38		MIT Na-BRÜTER (GE) BRUTRATE 1.25	
	2000	2040	2000	2040	2000	2040
LWR (ORNL)	248	2200	133	220	146	650
LWR (SSW)	290	2500	123	210	140	470
GG (CEA)	327	3200	117	160	144	375
D <sub>2</sub> O (SSW)	168	1700	69	109	76	235
AGR (UKAEA)	232	2050				
THTR (GA)	114	800				
Na-BR (GE)	8.1	57				
Na1-BR (KFK)	13.3	87				

DURCHSATZ DURCH DIE WIEDERAUFBEREITUNGSANLAGEN  
IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND [t/a]

Tabelle 9

	1975		1980		1990		2000	
	1	2	1	2	1	2	1	2
LWR (ORNL)	252	252	656	648	2171	1945	4772	4038
LWR (SSW)	212	212	552	521	1828	1664	4017	3724
GG (CEA)	1018	1018	2652	2319	8777	5375	19300	7690
D <sub>2</sub> O (SSW)	548	548	1430	1287	4727	3321	10390	5813
Na1-BR (KFK)	176	-	457	-	1512	-	3322	-

1 EINTYPENSTRATEGIEN

2 ZWEITYPENSTRATEGIEN MIT DEM SCHNELLEN BRÜTER Na-1BR (KFK)

## 8. Diskussion der Ergebnisse

Die in den letzten drei Abschnitten dargelegten Ergebnisse sind das eigentliche Resultat des Studienkreises Kernenergieerreserven. Will man diese Fülle von teilweise komplexen Ergebnissen diskutieren, so kommt dabei ein gewisses Moment einer bestimmten Betrachtungsweise hinzu. In diesem Sinne stellt die Diskussion der Ergebnisse auch nur die persönliche Meinung der namentlich genannten Autoren dieser Studie dar.

Es ist nützlich, zunächst auf den nuklearen Energiebedarf einzugehen (Gleichung 1). Die als maximaler Bedarf ausgewiesene Kurve steigt etwa mit der Potenz  $2,34$  der Zeit, d.h. nicht exponentiell. Vielmehr findet man eine lineare Zunahme der Verdopplungszeit an nuklearer Energie mit der Zeit (Gleichung 2). Schon etwa 1986 hat diese Verdopplungszeit des nuklearen Energiebedarfs den Wert von  $7 \frac{1}{2}$  Jahren erreicht. 1980 wird zufolge der maximalen Schätzung ein Bedarf von  $20 \text{ GW}_e$  erwartet, im Jahre 2000 werden  $132 \text{ GW}_e$  an nuklearer Erzeugungskapazität erwartet. Die entsprechenden Zahlen für den minimalen Bedarf sind  $15 \text{ GW}_e$  bzw.  $85 \text{ GW}_e$ . Diese Schätzungen sind in guter Übereinstimmung mit entsprechenden Angaben z.B. von EURATOM bzw. Frankreich. In Abbildung Seite 10 ist ein Vergleich dieser Angaben dargestellt. Ebenso ist die Verdopplungszeit der Kurve des deutschen Energiebedarfs eingetragen.

Wenn wir uns jetzt den Ergebnissen der Ein- und Zweitypen-Strategien zuwenden, so sei zunächst auf einen bemerkenswerten Umstand hingewiesen: die in den Reaktordatenblöcken wiedergegebenen Eingangskostendaten (vgl. Tabelle 5) liegen nahe beieinander. Das bedeutet, daß die Auswertung der Kostenangaben zu sehr ähnlichen Energieerzeugungskosten führt.

So weist z.B. der französische Gas-Graphit-Reaktor nur um etwa  $15 \%$  höhere Energiekosten und nur um etwa  $30 \%$  höhere In-

vestitionskosten aus als der LWR (ORNL), während der sinn-  
gemäße Vergleich mit den entsprechenden englischen Angaben zu  
größeren Unterschieden führt.

Es war jedoch - wie schon erwähnt - nicht die Aufgabe dieses  
Studienkreises, eine Wichtung und Wertung der Eingangsdaten  
vorzunehmen.

Wir wenden uns jetzt den Kosten der Eintypen-Strategien zu.  
Beschränken wir uns dabei auf die nähere Zukunft, so sind die  
Ergebnisse der Eintypen-Strategien charakteristisch, weil die  
Zweitypen-Strategien ausweisen, daß Brüter erst später einen  
größeren Prozentsatz der nuklearen Stromerzeugung übernehmen.  
Wegen der Ähnlichkeit der Kosten ist es nicht sehr interessant,  
auf genaue ~~Zahlwerte~~ einzugehen, vielmehr interessiert nur die  
Größenordnung und der ungefähre Zeitpunkt, zu dem diese Kosten  
anfallen. Im Jahre 1975 haben die jährlichen Energiekosten,  
die sich aus Kapital-, Betriebs- und Brennstoffkosten zusammen-  
setzen, den Wert von etwa 1 Milliarde DM pro Jahr erreicht. 1977  
erreichen allein die Investitionskosten den Wert von 1 Milliarde  
DM pro Jahr, während 1979 allein der Kapitaldienst für die  
Investitionskosten sich auf etwa die Summe von 1 Milliarde DM  
beläuft (vgl. Tabelle 7).

Werfen wir nun einen Blick auf die Kosten der Zweitypen-  
Strategien, so stellt sich heraus, daß etwa im Jahre 1984 der  
Unterschied in den bis dahin kumulierten jährlichen Energie-  
kosten zwischen der Eintypen-Strategie LWR (ORNL) und der Zwei-  
typen-Strategie LWR (ORNL)/Na-1-BR (KFK) 1 Milliarde DM ausmacht.  
Es ist nützlich, sich diese Zahlen vor Augen zu halten, wenn  
heute gelegentlich die Entwicklungskosten für eine Reaktorent-  
wicklungslinie in Höhe von 1/2 bis 1 Milliarde DM diskutiert  
werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Frage nach der kumulierten Menge an erzeugtem spaltbarem Plutonium. Für 1970 werden ungefähr insgesamt 500 kg erwartet. 1980 werden im Bereich der Bundesrepublik 10 bis 20 t Plutonium vorliegen. Das aber bedeutet, daß in den nächsten Jahren die Technologie des Plutoniums und der chemischen Wiederaufarbeitung beherrscht werden muß. Weiter bedeutet das, daß diese Mengen an Plutonium - anders als beim U-233-Thorium-Zyklus - durch ihr bloßes Vorhandensein eine Fortsetzung des intensiven Studiums des Plutonium-U-238-Zyklus erzwingen. Das steht in einem inneren Zusammenhang zu der hier in aller Schärfe dargestellten Tatsache, daß der bei den Eintypen-Strategien auftretende Natururan-Verbrauch zu dem Aufbau von fast gleich großen Vorräten an abgereichertem Uran führt. So weist z.B. die LWR (ORNL)-Strategie für das Jahr 2000 einen kumulierten Natururan-Bedarf von ungefähr  $250 \cdot 10^3$  t aus, während der Aufbau von Vorräten an abgereichertem Uran sich auf etwa  $230 \cdot 10^3$  t beläuft. Beide Teile, das aufgehäufte Plutonium und das aufgehäufte Abfall-Uran zwingen dazu, sich mit dem Plutonium-U-238-Zyklus zu beschäftigen.

Vielleicht ist es vernünftig, noch etwas speziell über den THTR-Reaktor zu sagen. Die Massenbilanzen weisen aus, daß z.B. im Jahre 2000 ein Natururan-Bedarf von  $114 \cdot 10^3$  t vorliegt, der von einem Thorium-Bedarf von nur  $14,9 \cdot 10^3$  t begleitet wird, d.h. 13 % des Natururan-Bedarfs. Solange der THTR nicht echt brütet, ist er also eher ein Reaktor mit Uran-235-Zyklus, der im Vergleich zu anderen Eintypen-Strategien einen relativ kleinen Verbrauch an Natururan mit sich bringt. Die hohe Anreicherung des Urans im THTR führt dann dazu, daß die Energiekosten höher als bei Schnellbrutreaktoren sind, obwohl die Anlagekosten im Datenblock dieser Studie geringer sind als bei den schnellen Brütern. In diesem Zusammenhang ist nochmals darauf hinzuweisen, daß bei der Aufstellung des Datenblocks des THTR-Reaktors dem im Brennstoffkreislauf des THTR-Reaktors zirkulierenden U-233 der Wert Null beigegeben wurde.

Nur kurz sei auf die Abhängigkeit vom Uran-Preis eingegangen. Bei einer Anhebung des Preises von Uran-Konzentrat (und damit im Zusammenhang für Plutonium) von 8 auf 30 \$/lb ändern sich die spezifischen Energiekosten um etwa 3 % beim Na-1-Schnellbrüter, um etwa 8 % beim D<sub>2</sub>O-Reaktor, um etwa 20 % beim LWR (ORNL), um etwa 25 % beim AGR und um 25 % beim LWR (SSW).

Auf die eigentlich dieser Studie zugrundeliegende Frage nach dem Verbrauch der Uran-Vorräte wollen wir jetzt zu sprechen kommen. Dabei wollen wir die Ergebnisse sowohl der Eintypen-Strategien als auch der Zweitypen-Strategien verwenden. Hierzu machen wir uns klar, daß gemäß den Überlegungen des 3. Abschnitts bis zum Jahre 2000 etwa  $10^5$  t Uranerze zur Verfügung stehen. Ist man bereit, auch die dritte Kategorie der deutlich teureren Erze in Rechnung zu stellen, so stehen noch einmal etwa  $10^5$  t, insgesamt also etwa 200.000 t zur Verfügung. Wir wollen diese Vorräte als Vorräte der Klasse 1 bezeichnen. Im Hinblick auf die Unsicherheit der Prospektion und unter Berücksichtigung vieler Stimmen aus der Reihe der Experten kann damit gerechnet werden, daß vielleicht noch einmal zusätzlich 200.000 t mit einem relativ hohen Preisniveau für den Bereich Deutschlands (BR) zur Verfügung stehen. Diese nur eventuell zur Verfügung stehenden Vorräte seien als Vorräte der Klasse 2 bezeichnet. Die Vorräte der Klassen 1 und 2 machen also etwa 400.000 t aus. Betrachten wir jetzt die Größe des kumulierten Natururan-Bedarfs zunächst bei den Eintypen-Strategien bis zum Jahre 2000, so zeigt es sich, daß der THTR mit  $114 \cdot 10^3$  t und der  $D_2O$ -Reaktor mit  $168 \cdot 10^3$  t im Rahmen der Vorräte der Klasse 1 bleiben (vgl. Seite 49).

Alle übrigen Reaktortypen, beginnend beim AGR mit  $232 \cdot 10^3$  t und endend beim Gas-Graphit-Reaktor mit  $327 \cdot 10^3$  t, müssen zu den Vorräten der Klasse 1 die der Klasse 2 hinzunehmen. Bei diesem Vergleich der Eintypen-Strategien haben wir die Brüter nicht berücksichtigt, da sie nicht allein starten können. Man kann also feststellen, daß bis zum Jahre 2000 der Uran-Verbrauch der Eintypen-Strategien bei einzelnen Typen zwar hoch aber nicht inhibitiv ist. Der Uran-Verbrauch der Zweitypen-Strategien liegt demgegenüber bei kleineren jedoch nicht erheblich kleineren Werten, da ja etwa bis zu den Jahren 1985 bis 1990 jede Zweitypen-Strategie der entsprechenden Eintypen-Strategie und deren Uran-Verbrauch sehr ähnlich ist. Der Uran-Verbrauch der Zweitypen-Strategien reicht von  $69 \cdot 10^3$  t bei  $D_2O/Na-1$  bis zu  $133 \cdot 10^3$  t bei LWR (ORNL)/Na-1, verbleibt also klar in der Klasse 1.

Qualitativ ganz anders sieht dagegen der Bedarf im Jahre 2040 aus (vgl. Seite 51). Jede Eintypen-Strategie führt zu einem Bedarf an Natururanerzen, der die Menge der Klassen 1 und 2 klar übersteigt. Der Bedarf reicht von  $1700 \cdot 10^3$  t ( $D_2O$ ) bis zu  $3200 \cdot 10^3$  t (Gas-Graphit). Nach allem, was wir

heute wissen, ist ein solcher Natururan-Bedarf inhibitiv, auch wenn man die Unsicherheiten der Vorhersagen in Rechnung stellt. Es ist also nicht möglich, den Bedarf an nuklearer Energie auf lange Sicht nur mit einem konvertierenden Reaktortyp zu decken.

Hier bieten sich zwei Auswege. Entweder man betreibt Uran-Gewinnung aus dem Meerwasser oder man setzt Brutreaktoren ein.

Wenn wir den in dieser Studie näher untersuchten Weg des Brütens betrachten, so ist es erforderlich, den kumulierten Natururan-Bedarf zu ermitteln, der zu dem Zeitpunkt vorliegt, an dem der letzte Konverter-Reaktor unserer Zweitypen-Strategien stillgelegt worden ist.

Bei den Zweitypen-Strategien mit Na-1-BR (KFK) ist das vor 2040 der Fall. Nach diesem Zeitpunkt wird auf lange Sicht nur noch abgereichertes Uran für die neu zu errichtenden Brutreaktoren benutzt. Der genannte Bedarf bis 2040 kann auf Seite 51 abgelesen werden. Er ist bis 1 1/2 Größenordnungen kleiner als der Natururan-Bedarf eines konvertierenden Reaktortyps. In diesem Sinne ergibt sich bis zum Jahre 2040 ein Natururan-Bedarf wie folgt:

LWR (ORNL) / Na-1-BR (KFK):	$220 \cdot 10^3$ t
LWR (SSW) / Na-1-BR (KFK):	$210 \cdot 10^3$ t
GG (CEA) / Na-1-BR (KFK):	$160 \cdot 10^3$ t
D <sub>2</sub> O (SSW) / Na-1-BR (KFK):	$109 \cdot 10^3$ t

Das Maximum der installierten Konverterleistung ergibt sich wie folgt:

LWR (ORNL) / Na-1-BR (KFK):	50 GW <sub>e</sub> im Jahre 1998
LWR (SSW) / Na-1-BR (KFK):	38 GW <sub>e</sub> im Jahre 1993
GG (CEA) / Na-1-BR (KFK):	32 GW <sub>e</sub> im Jahre 1992
D <sub>2</sub> O (SSW) / Na-1-BR (KFK):	37 GW <sub>e</sub> im Jahre 1994

Der Abfall der Konverterleistung beginnt jeweils um 5 bis 10 Jahren danach. Verfolgt man demgegenüber die Zweitypen-Strategien der GE-Brüter bis zum Jahre 2040, wo in etwa auch hier die letzten Konverter stillgelegt sein werden, so ergibt sich das folgende Bild:

LWR (ORNL) / Na-BR (GE):	$650 \cdot 10^3$	t
LWR (SSW) / Na-BR (GE):	$470 \cdot 10^3$	t
GG (CEA) / Na-BR (GE):	$375 \cdot 10^3$	t
D <sub>2</sub> O (SSW) / Na-BR (GE):	$235 \cdot 10^3$	t

Das Maximum der installierten Konverterleistung ergibt sich dabei wie folgt:

LWR (ORNL) / Na-BR (GE):	80	GW <sub>e</sub>	im Jahre 2008
LWR (SSW) / Na-BR (GE):	60	GW <sub>e</sub>	im Jahre 2005
GG (CEA) / Na-BR (GE):	48	GW <sub>e</sub>	im Jahre 2002
D <sub>2</sub> O (SSW) / Na-BR (GE):	58	GW <sub>e</sub>	im Jahre 2005

Dieses Resultat ist sehr bemerkenswert. Der relativ schwach brütende GE-Brüter mit der Brutrate 1,25 führt mit den Leichtwasserreaktoren als Konverter zu einem absolut inhibitiven Natururan-Verbrauch, während der KFK-Brüter mit der Brutrate 1,38 zu einem Bedarf führt, der auch mit den schwach konvertierenden Konvertern gerade noch im Rahmen der Klasse 1 gedeckt werden könnte. Mehr als das: der beste Konverter (D<sub>2</sub>O) führt zusammen mit dem schwächer brütenden Brüter (GE) zu einem Gesamtbedarf ( $235 \cdot 10^3$  t), der größer ist als der Bedarf ( $220 \cdot 10^3$  t), der beim Verbund des schwächsten Konverters (LWR-ORNL) mit dem stärker brütenden Brüter (KFK) entsteht.

Wir stellen weiter fest: falls der hier betrachtete Schnellbrutreaktor relativ gut brütet, d.h. falls er eine Brutrate von etwa 1,4 hat, ist es denkbar, daß solche Brütergenerationen im Wechselspiel mit jedem Konvertertyp aufgebaut werden können, ohne mehr als die Vorräte der Klasse 1 zu verbrauchen.

Es ist also von daher geurteilt nicht erforderlich, eine Zwischengeneration von hochkonvertierenden Reaktoren zu entwickeln und etwa in den Jahren 1985 - 1990 einzusetzen. Hat dagegen der betrachtete Schnellbrutreaktor eine relativ kleine Brutrate, so ist das Wechselspiel allein mit einem Leichtwasserreaktor nicht möglich, d.h. aber, es ist eine Zwischengeneration, z.B. von D<sub>2</sub>O-Reaktoren erforderlich. Das Minimum an Natururan-Verbrauch, das man so erreichen kann, ist durch die Zweitypen-Strategie

$D_2O/GE$  gegeben und liegt wieder an der Grenze der durch die Klasse 1 gegebenen Möglichkeiten. Diese Überlegung ergibt, daß es interessant sein könnte, die Zusatzkosten, die durch die Einführung einer Zwischengeneration von hochkonvertierenden Reaktoren entstehen, mit den Kosten zu vergleichen, die vielleicht bei der Bereitstellung einer hohen Brutrate eines schnellen Brütters entstehen.

Es ist weiter festzustellen, daß, wenn man einen kumulierten Natururanverbrauch von etwa  $220 \cdot 10^3$  t für riskant hält, eine Zwischengeneration von hochkonvertierenden Reaktoren erforderlich wird. Dann müssen jedoch auch stärker brütende Brüter gebaut werden.

Das absolute Minimum, das also unter den gegebenen Umständen denkbar ist, wird durch die Zweitypen-Strategie  $D_2O/Na-1$  (KFK) erreicht, die nur  $109 \cdot 10^3$  t verbraucht.

Wenn hier von Zwischengeneration die Rede ist, so ist damit nicht gemeint, daß sich diese Reaktorgeneration zeitlich zwischen die heute verfügbaren Konverter und die schnellen Brüter schieben soll oder kann. Vielmehr ist es in jedem Fall erforderlich, den Aufbau der Brütergeneration so früh wie möglich, d.h. etwa 1980 zu beginnen. Unsere Zweitypen-Strategien weisen aus, daß für den Fall, daß die Brüter etwa im Jahre 2000 zum Tragen kommen sollen, schon 1985 etwa  $12 \text{ GW}_e$  an Brüter-Leistung installiert sein müssen. Das heißt aber, daß die Zwischengeneration zu den heute verfügbaren Konvertern hinzukommt. In diesem Sinne handelt es sich eher um eine Zusatzgeneration, die das Maximum ihrer Installation in den 90er Jahren erreichen sollte.

Stellt man dem eben diskutierten Weg des Brütens die Möglichkeit der Urangewinnung aus dem Meerwasser gegenüber, so gelten die eben gemachten Feststellungen naturgemäß nicht. Nach dem, was man heute weiß, dürften dann so große Vorräte an Uran zur Verfügung stehen, daß es unangemessen wäre, in unserem Jahrhundert von diesem Gesichtspunkt her Maßnahmen zur sparsamen Verwendung von Uran zu ergreifen.

Die Frage der Urangewinnung aus Meerwasser ist wohl noch als technisch und wirtschaftlich ungeklärt zu bezeichnen, während der Weg des Brütens technisch gesichert erscheint und mit großer Wahrscheinlichkeit Preisvorteile mit sich bringen wird.

Kommt es beim Einsatz von schnellen Brütern bis zum Jahre 2000 auf lange Sicht zwar zu einem Unterschied von 1 1/2 Größenordnungen im Uran-Verbrauch, so ist etwas Ähnliches auf dem Gebiet der Kosten unmöglich. Da es sich in jedem Fall um Anlagen mit einem Reaktor als Wärmequelle, mit Wärmeaustauscher, Rohrleitungen, Pumpen und Turbinen handelt, können die Unterschiede nur im Bereich von etwa 15 bis 25 % liegen. Das heißt aber, daß hier technische Einzelheiten die Unterschiede in den Kosten diktieren. Im Rahmen der hier vorliegenden Kostendaten ergibt sich während der Zeit 1970 bis 1985 und 1985 bis 2000 die folgende Gliederung der spezifischen Kosten:

1970 - 1985		1985 - 2000	
Na-BR (GE)	1,62 [DPf/kWh]	Na-1-BR (KFK)	1,65 [DPf/kWh]
Na-1-BR (KFK)	1,62 "	Na-BR (GE)	1,76 "
THTR (GA)	1,80 "	THTR (GA)	2,00 "
LWR (ORNL)	1,91 "	D <sub>2</sub> O (SSW)	2,08 "
AGR (UKAEA)	2,02 "	LWR (ORNL)	2,09 "
D <sub>2</sub> O (SSW)	2,09 "	AGR (UKAEA)	2,25 "
LWR (SSW)	2,12 "	GG (CEA)	2,30 "
GG (CEA)	2,19 "	LWR (SSW)	2,31 "

Diese Angaben sind mit einiger Vorsicht zu beurteilen, denn die hier vorgenommenen Kostenbetrachtungen sind notwendig etwas summarisch und als Schätzungen auf das Jahr 1970 bezogen. Vielleicht kann aber doch soviel daraus abgelesen werden, daß bei den schnellen Brütertypen auch allein von den Kosten her ein Anreiz besteht, sich dieser Entwicklung zu widmen.

Es ist also nicht so, daß die Vorteile der Schonung der Uran-Vorräte, von denen oben die Rede war, mit einem Kostennachteil einhergeht. Vielmehr ist das Gegenteil der Fall.

Es ist notwendig, noch einmal im Zusammenhang mit den Kosten auf die Frage der Zusatzgeneration, z.B. der D<sub>2</sub>O-Reaktoren einzugehen. Solange der Uran-Konzentratpreis bei 8 \$/lb bleibt, haben die LWR (ORNL) gemäß unseren Daten einen Preisvorteil. Kommen jedoch Natururan-Vorräte mit einem Kon-

zentratpreis von 30 \$/lb zur Verwendung, dann ist der Preisvorteil selbst der LWR (ORNL) gegenüber  $D_2O$ -Reaktoren unseres Datenblocks verloren gegangen. Beide weisen dann spezifische Energiekosten von 2,25 bzw. 2,30 DPf/kWh aus. Im Vergleich zum LWR (SSW) liegt der  $D_2O$  (SSW) Reaktor ohnehin günstiger.

Weiterhin ist zu bedenken, daß die heute bestehenden amerikanischen Diffusionsanlagen einen Bedarf an angereichertem Uran decken können, wie er etwa einer Installation von 100  $GW_e$  in LWR entspricht. Es könnte also in den 90er Jahren, wo unsere Zweitypen-Strategien ein Maximum der installierten Konverterleistung ausweisen, sehr wohl ein Engpaß in der Versorgung mit angereichertem Uran entstehen, wenn nicht nur in Deutschland, sondern auch in weiteren Gebieten eine LWR/Brüter-Strategie verfolgt wird. Durch Installation einer Zusatzgeneration von  $D_2O$ -Reaktoren würde jedenfalls diese Schwierigkeit vermieden. Es wäre also interessant, die Frage der Installation von Trennanlagen einmal näher zu verfolgen.

Abschließend ist eine Bemerkung zu unserer Schätzung der Aufarbeitungskapazitäten angebracht. An dieser Schätzung ist eines ganz deutlich zu erkennen, daß nämlich Natururan-Reaktoren eine wesentlich höhere Aufarbeitungskapazität benötigen, als Reaktoren mit angereichertem Uran und Brüter. Die Größe der Aufarbeitungskapazitäten ist gewissermaßen komplementär zu den Trennanlagenkapazitäten. Man wird einwenden können, daß bei Eintypenstrategien, die Aufarbeitung des Brennstoffs nicht notwendig ist. Der Einsatz von Brutreaktoren erfordert jedoch auf jeden Fall auch die Aufarbeitung von Natururanbrennstoff. Wegen des zunehmenden Übergewichts der Brüter ist dann aber der Unterschied zu den Jahresdurchsätzen zumindest bei Zweitypenstrategien LWR (ORNL) - Na-1-BR (KFK) und  $D_2O$  (SSW) - Na-1-BR (KFK) nicht mehr sehr groß.

Im Sinne einer sauberen Abgrenzung der hier benutzten Argumente ist es erforderlich, darauf hinzuweisen, daß es nicht möglich war, bis zu dem vom FORATOM-Kongreß gesetzten Termin die folgenden Möglichkeiten zu untersuchen:

1. Zurückführen von Plutonium in thermische Reaktoren
2. Aufbauen einer Generation schneller Brüter durch Anfahren mit U-235 anstelle von Plutonium.

Die Möglichkeit 1 kann immer verfolgt werden, wenn es zu einem Engpaß bei der Lieferung von angereichertem Uran kommt; allerdings dürfte zufolge des schlechten Kritikalitätsfaktors von Plutonium in thermischen Reaktoren im Vergleich zu U-235 und zufolge des dann nicht möglichen Installierens von schnellen Brütern der Aufbau der Brüter-Generation erheblich verzögert werden, was zu einem steigenden kumulierten Gesamtbedarf an Natururan führt. Weiter verdient insbesondere die Möglichkeit 2 Beachtung. Schnelle Brüter mit U-235 haben eine Bruterate von mindestens 1,05 bis 1,10 und stellen damit den an sich effektivsten "Konverter" dar. Es ist zu prüfen, wie hier der kumulierte Natururan-Bedarf aussieht und zu welcher Zeit das Maximum des Bedarfs an angereichertem Uran vorliegt.

Zum Abschluß der Diskussion der Ergebnisse soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß diese Studie nur einem begrenzten Problemkreis gewidmet war. Es war nicht das Ziel, zu einer alle Aspekte umfassenden Wertung der verschiedenen Typen und der damit verbundenen Strategien zu kommen. Eine solche umfassende Wertung müßte tiefer in technische Einzelheiten und in die Details der Kostenfaktoren eindringen. Auch müßten Devisenprobleme in Zusammenhang mit politischen Fragen betrachtet werden. Das alles übersteigt das Ziel dieser Studie. Die in dieser Studie bereitgestellten Daten sollten vielmehr Unterlagen für solche Betrachtungen liefern und insbesondere unter der Berücksichtigung der Frage nach Uranvorräten einen gewissen Rahmen abstecken.

## 9. Kurzgefaßte Schlußfolgerungen

Es ist möglich, unter ausdrücklichem Hinweis auf die Diskussion der Ergebnisse, wie sie im Abschnitt 8 erfolgt ist, die folgenden Schlußfolgerungen zu formulieren:

1. Eine obere Bedarfsschätzung der installierten nuklearen Leistung weist aus, daß im Jahre 2000 etwa 130 GW<sub>e</sub> erwartet werden.
2. Im Jahre 1975 werden etwa 1 Milliarde DM pro Jahr an gesamten jährlichen nuklearen Energiekosten anfallen. 1977 werden allein die jährlichen Investitionen und 1979 allein der Kapitaldienst für die jährlichen Investitionen den Wert von 1 Milliarde DM pro Jahr erreichen.

3. Im Jahre 1970 werden im Bereich der Bundesrepublik etwa 500 kg Plutonium erzeugt worden sein; 1980 wird dieser Wert zwischen 10 und 20 t liegen.

4. Sollen in der Bundesrepublik nicht mehr als insgesamt 200 bis  $300 \cdot 10^3$  t Natururan verbraucht werden, so ist die Einführung der Brüter zwingend. Andernfalls geht der Bedarf an Natururan nach dem Jahre 2000 rasch in die Mio t Natururan. Eine solche Menge könnte wohl nur aus dem Meer gewonnen werden, falls das technisch und wirtschaftlich möglich ist.

5. Die Möglichkeit, eine Generation von schnellen Brütern unter anfänglicher Verwendung von U-235 in diesen Brütern aufzubauen, ist in dieser Studie noch nicht untersucht worden. Deckt man den Plutonium-Bedarf der Generation von schnellen Brütern aus Konverter-Reaktoren, so bleibt der Natururan-Bedarf bei jeder denkbaren Kombination Konverter/Brüter unter etwa  $200 \cdot 10^3$  t, falls der Brüter eine Bruterate von etwa 1,4 oder darüber hat. Es ist dann keine Zusatzgeneration von hochkonvertierenden Reaktoren erforderlich.

6. Es ist vom Gesichtspunkt der Schonung der Uran-Reserven besser, einen schwach konvertierenden Konverter mit einem gut brütenden Brüter zu kombinieren, als einen gut konvertierenden Konverter mit einem schwach brütenden Brüter.

7. Hat der schnelle Brüter der Brüter-Generation eine Bruterate, die kleiner ist als 1,4, so wird eine Zusatzgeneration von z.B. D<sub>2</sub>O-Reaktoren erforderlich, die in den Jahren 1985 - 1990 das Maximum ihrer Installation erreichen müßte.

8. Will man im Bereich Deutschlands (BR) in jedem Falle deutlich unter einem Gesamtverbrauch von  $200 \cdot 10^3$  t bleiben, so ist die Einhaltung einer Bruterate von mindestens 1,4 bei den schnellen Brütern und das Errichten einer Zusatzgeneration von z.B. D<sub>2</sub>O-Reaktoren erforderlich.

9. Im Rahmen der hier vorliegenden Datenblöcke über Reaktorkosten hat der schnelle Brüter das günstigste Kostenpotential.

10. Für die 90er Jahre wird das Maximum der Installation von Konvertern erwartet. Handelt es sich dabei um Leichtwasserreaktoren, so wird eine Kapazität von etwa  $45 \text{ GW}_e$  erwartet, was etwa die Hälfte der heute in den USA installierten Kapazität an Trennanlagen auslasten würde. Es ist zu prüfen, ob dann die Versorgungen mit angereichertem Uran gewährleistet werden kann.

11. Die erforderliche Aufarbeitungsanlagenkapazität bei Reaktoren mit angereichertem Uran ist relativ klein (etwa  $4500 \text{ t}$  pro Jahr im Jahre 2000). Für Natururan-Konverter ist dementsprechend eine Kapazität bis zu  $20.000 \text{ t}$  pro Jahr erforderlich, falls diese allein den gesamten nuklearen Energiebedarf decken. Im Falle der Zweitypen-Strategien LWR (ORNL) - Na-1-BR (KFK) und  $\text{D}_2\text{O}$  (SSW) - Na-1-BR (KFK) ist dieser Unterschied im Jahre 2000 nicht mehr sehr groß ( $4700$  bzw.  $7600 \text{ t/a}$ ).

L i t e r a t u r

- [1] W.H. ZINN; mündliche Mitteilung
- [2] K. ERGEN, E.L. ZEBROSKI: Breeding - how soon a necessity. Nucleonics, Febr. 1960 (S.60)
- [3] E.A. ESCHBACH: Plutonium value analysis. 3. ICPUAE, P/246, Genf 1964
- [4] CIVILIAN NUCLEAR POWER, A report to the President. USAEC (Nov. 20, 1962)
- [5] J.R. DIETRICH: Efficient utilization of nuclear fuels. Power Reactor Technology, 6, No. 4 (1963)
- [6] R. GIBRAT: L'économie énergétique nucléaire à long terme. Energie nucléaire, Vol. 5, No. 6, 397 (Sept. 1963)  
Vol. 5, No. 7, 485 (Nov. 1963)
- [7] D. RITTER und G. BLÄSSER: Brennstoffbilanzen der Kernenergie, Atomwirtschaft, Febr. 1965
- [8] J.J. WENT: Considerations for a longterm development for the use of fission energy and the consequence for presently developed power reactors. Nukleonik 6, Heft 5 (Sept. 1964)
- [9] EURATOM-BERICHT EUR/C/4000/4/64d: Lage und Perspektiven der Kernenergie in der europäischen Gemeinschaft (Juni 1965)
- [10] C.J. BALDWIN, C.A. HOFMAN: System planning by simulation with mathematical models. Proc. Am. Power Conf. Vol. XXII, 598 (1960)  
D.N. REPS, J.A. ROSE: Strategy for expansion of utility generation. Power Apparatus and Systems (Febr. 1960)  
C.J. BALDWIN et al.: Economic aspects of systems expansion with nuclear units. Power Apparatus and Systems (Febr. 1963)
- [11] ORNL-REPORT No. 3686: A comparative evaluation of advanced converter (Jan. 1965)
- [12] R. GIBRAT: mündliche Mitteilung
- [13] REPORT GEAP-4418: Liquid metal fast breeder reactor design study (Jan. 1964)
- [14] Referenzstudie für den Natriumgekühlten schnellen Brutreaktor (Na-1). Gesellschaft für Kernforschung mbH. Karlsruhe KFK 299 (Dez. 1964)

- [15] Die ausführliche Darstellung erscheint voraussichtlich Ende 1965 in den Berichten des Kernforschungszentrums Karlsruhe
- [16] Interner Bericht des Studienkreises Kernenergieserven
- [17] MONTANUNION, EWG, EURATOM: Untersuchungen über die langfristigen energiewirtschaftlichen Aussichten der Europäischen Gemeinschaft. Luxemburg 1964
- [18] G.F. TAPE et al.: Future energy needs and the role of nuclear power. 3. ICPUAE, P/192, Genf 1964
- [19] R. GIBRAT: The essential factors in a balanced economy. 3. ICPUAE, P/99, Genf 1964
- [20] H. GRÜMM: Dynamik der Kernbrennstoffzyklen. Nukleonik (im Druck)
- [21] H. SCHMALE, A. PERSSON und P. ERKES: Verfahren zur Berechnung der Brennstoffkreislaufkosten von Kernkraftwerken in Form eines festen und eines variablen Kostenanteils. Weltkraftkonferenz 1964, Bericht 128
- [22] H. GRÜMM: Vereinfachte Verfahren zur Berechnung des Brennstoffkostenanteils. Atomwirtschaft (im Druck)
- [23] USAEC-REPORT TID 8201: An analysis of the current and long term availability of Uranium and Thorium (1959)
- [24] USAEC-REPORT TID 8207: Energy from Uranium and Coal Reserves (1960)
- [25] CIVILIAN NUCLEAR POWER: A report to the President. USAEC (1962), App. II, S. 31, Tab. 1
- [26] R.L. FAULKNER, W.H. McVEY: Fuel resources and availability for civilian nuclear power 1964 - 2000. 3. ICPUAE, P/256, Genf 1964
- [27] R. SPENCE et al.: Nature 203, 1110 (1964)
- [28] J. GAUSSENS, H. PAILLOT: Study of the long-term values and prices of Plutonium, CEA-R 2795
- [29] E.A. ESCHBACH et al.: Pure - A computer code for calculating Plutonium value. Report HW 71811 (1961)
- [30] F.L. DAWSON: Plutonium as a power reactor fuel. Report HW 75007 (1962)