Reichweite und Potential der Kernenergie : Potential der technischen Entwicklung und Reichweite der Brennstoffvorräte für die nukleare Stromerzeugung

Autor(en): **Max, Arthur**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **84 (1993)**

Heft 24

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902762

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bei Ausweitung der Kernenergie auf 3000 GWe bis zum Jahre 2030 würde der Anteil der Kernenergie am Primärenergieeinsatz weltweit auf nahezu 30% ansteigen. Selbst ein so ambitioniertes Kernkraftwerksprogramm könnte die Menge des jährlichen CO_2-Ausstosses bestenfalls konstant halten. Wie steht es aber kurz-, mittel- und langfristig mit den Kern-Brennstoffvorräten? Welche technischen Massnahmen und Entwicklungen beeinflussen massgeblich Reichweite und Potential der nuklearen Stromerzeugung? Bezüglich des langfristigen Potentials der Kernenergie, also für die Entwicklung der Kernenergie bis weit über das Jahr 2000 hinaus, ergibt sich die grundsätzliche Frage, wie gross aus heutiger Sicht die Uranvorkommen der Welt und wie verlässlich die Angaben zu Reserven sind.

Reichweite und Potential der Kernenergie

Potential der technischen Entwicklung und Reichweite der Brennstoffvorräte für die nukleare Stromerzeugung

■ Arthur Max

Einleitung

Der Beitrag der Kernenergie zur Stromerzeugung ist beeindruckend: Im Jahr 1991 betrug der Anteil der Kernkraftwerke an der gesamten Stromproduktion in den Ländern dieser Erde knapp 17%.

Die Perspektiven für die Kernenergie sind jedoch für dieses und voraussichtlich auch noch für das kommende Jahrzehnt alles andere als ermutigend. In vielen Ländern des Westens und des Ostens stagniert der Neubau von Kernreaktoren. Dieses ist einer der wesentlichen Gründe für das gegenwärtige Überangebot am Uranmarkt. Dieses Überangebot ist aber auch auf die Anbieter in der Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) zurückzuführen, die jetzt verstärkt in den westlichen Uranmarkt drängen. Die beabsichtigte Umwandlung des hochangereicherten militärischen Urans aus russischen Waffenarsenalen in Kernbrennstoff für die friedliche Nutzung verstärkt noch den Eindruck, dass Uran in Hülle und Fülle vorhanden sei.

Die Forderung des Klimaschutzes und das stetige Wachstum der Weltbevölkerung haben noch nicht zu dem erhofften Durchbruch der Kernenergie auf breiter Front geführt. Angesichts der beschränkten Potentiale erneuerbarer Energien gilt es jedoch weithin als unumstritten, dass der Beitrag der Kernenergie ganz beträchtlich erhöht werden muss, wenn der Weltbevölkerung ein akzeptabler Lebensstandard gewährleistet werden soll und gleichzeitig mit der Klimavorsorge ernst gemacht werden soll.

Mit einem verstärkten Einsatz der Kernenergie sind massgebliche Fragen verbunden:

1. Sind hinreichend Uranreserven vorrätig, um im Rahmen ambitionierter und langfristiger Leichtwasserreaktor-Zubauprogramme die Brennstoffversorgung mengenmässig zu gewährleisten?
2. Wann und in welchem Umfang ist der Einsatz fortgeschrittener Reaktortechnologien notwendig, damit die Kernenergie den von ihr erwarteten Beitrag leisten kann?

Adresse des Autors:
Dr. dipl. phys. *Arthur Max*, Nukem GmbH, D-63754 Alzenau.

Bevor diese Fragen eingehend behandelt werden, sollen zunächst die kurz- und mittelfristigen Aspekte der Uranversorgung beleuchtet werden.

Historische Entwicklung von Uranbedarf und -versorgung

Hinsichtlich der historischen Entwicklung des Uranmarktes der westlichen Welt können heute grob drei wesentliche Perioden unterschieden werden (Bild 1):

– Die Uranindustrie der westlichen Welt erlebte ihren ersten «Boom» in den späten 50er und frühen 60er Jahren, als nahezu die gesamte Uranproduktion von den Kernwaffenprogrammen der Nuklearmächte des Westens absorbiert wurde. Im Jahr 1959 erreichte die Uranproduktion einen Jahreshöchstwert von etwa 34000 t U. Eine derart hohe Jahresproduktion sollte erst etwa 20 Jahre später, also in der zweiten Hälfte der 70er Jahre, wieder erreicht werden.

Mit dem Auslaufen der militärischen Uranbeschaffungsprogramme Mitte der 60er Jahre wurde die Uranproduktion teilweise im Rahmen von Stützungsprogrammen der Regierungen verschiedener Uranproduzentenländer wie USA, Kanada und Australien aufgekauft, um den Niedergang der einheimischen Uranindustrie abzuwenden. Diese Phase hielt bis in die frühen 70er Jahre hinein an. Ende der 60er/Anfang der 70er Jahre setzte der zivile Uranbedarf der Kernkraftwerksbetreiber ein. Er wurde massgeblich stimuliert durch die umfangreichen Kernkraftwerksprogramme, die unter dem Eindruck der Ölkrise von 1973 beschlossen wurden.

In der damaligen Zeit wurde durch die Anreicherungspolitik der amerikanischen Anreicherungsbehörde USERDA, dem heutigen U.S. DOE, die bis etwa Mitte der 70er Jahre als Monopolist für Anreicherungsdienstleistungen auftrat, der Grundstein gelegt für eine dem tatsächlichen Bedarfszeitpunkt weit vorauseilende Uranbeschaffungspolitik.

Um ihre Verpflichtungen zur Abnahme von Trennarbeit zu erfüllen, mussten die EVUs Uran bereitstellen. Daher waren sie gezwungen, entsprechende langfristige Uranlieferverträge mit Uranproduzenten abzuschliessen.

Als die ehrgeizigen Reaktorzubauprogramme schliesslich drastisch reduziert wurden, blieb der Uranbedarf zur Erfüllung der eingegangenen Trennarbeitsverträge jedoch weitgehend bestehen. Er lag weit über dem tatsächlichen Bedarf der Reaktoren. Das führte dazu, dass 1980 die Uranproduktion der westlichen Welt bei etwa 44000 t U lag, der Bedarf der Reaktoren aber mit etwa 22000 t U um 50% niedriger.

Der Überhang an Trennarbeits- und Uranlieferverträgen wurde erst abgebaut, als das U.S.DOE schliesslich nach und nach zu flexibleren Vertragsbedingungen bereit war. Bis dahin hatten sich jedoch schon beträchtliche Uraninventare bei den EVUs aufgebaut.

Als Folge des grossen Ungleichgewichts zwischen vertraglichen Uranlieferungen und dem tatsächlichem Bedarf zum Betrieb der Reaktoren war die Zeit nach 1980 von turbulenten Entwicklungen im Uranmarkt gekennzeichnet, die hier jedoch nicht im einzelnen geschildert werden sollen. Hervorzuheben ist allerdings, dass die Uranproduktion des Westens in den 80er Jahren nahezu stetig gesunken ist. Sie betrug in den westlichen Ländern 1992 nur noch rund 23400 t U.

Der Natururanbedarf zum Betrieb der Reaktoren in den westlichen Ländern lag im Jahr 1992 aber bei rund 47900 t U. Die Differenz von etwa 24500 t U zwischen der Uranproduktion und dem Bedarf des Jahres 1992 wurde im wesentlichen durch Spotlieferungen sowjetischen Materials an europäische und amerikanische EVUs, durch die Auflösung staatlicher Uranvorräte, durch den Verkauf von Restbeständen ehemaliger Uranproduzenten sowie durch die vorhandenen Bestände westlicher EVUs gedeckt.

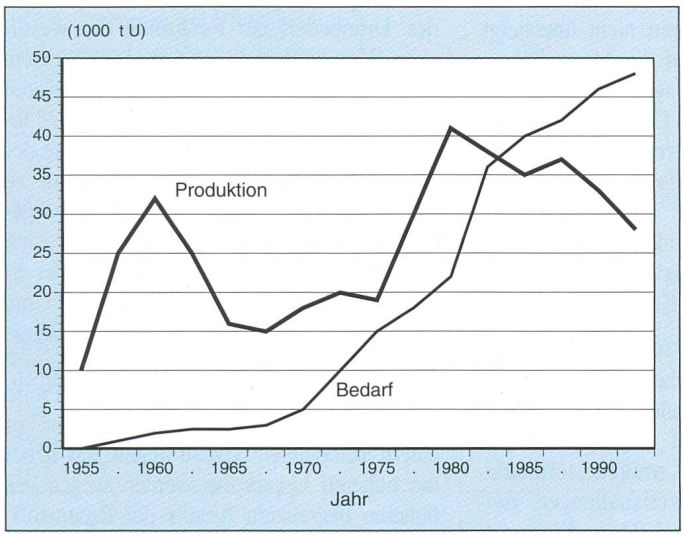


Bild 1 Uranproduktion und -bedarf der westlichen Welt (1956–1991)

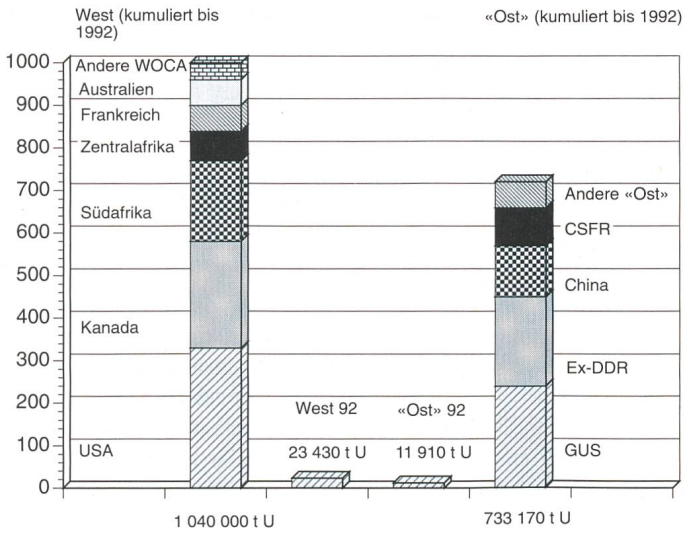


Bild 2 Vergleich der Uranproduktion in West und Ost

Kurz- und mittelfristige Perspektiven für die Uranversorgung

1988/89 gab es Anzeichen im Markt und im politischen Umfeld, die geeignet waren, zu einer Stabilisierung des Uranmarktes beizutragen, das heisst Uranangebot und tatsächlichen Bedarf weitgehend aufeinander abzustimmen. Produzenten und Verbraucher glaubten, wieder stabileren Zeiten entgegensehen zu können.

Doch zwei Effekte machten die Erwartungen auf einen Ausgleich zwischen Uranangebot und Uranbedarf letztlich zunichte:

– Die politischen Veränderungen in der Sowjetunion und Osteuropa haben eine Entwicklung hin zu einem globalen Markt für Kernbrennstoffe eingeleitet.
– Die fortschreitende internationale Abrüstung hat dem möglichen Einsatz militärischen Urans für friedliche Zwecke erhöhte Aufmerksamkeit verschafft.

Zunächst zum ersten dieser beiden Punkte. Diesbezüglich stellt sich die Frage:

Welche Bedeutung wird den einzelnen Republiken der GUS im Kernbrennstoffmarkt kurz- und mittelfristig zukommen? Hierzu einige Daten:

In der früheren Sowjetunion und ihren ehemaligen Satellitenstaaten sind seit der Mitte der vierziger Jahre insgesamt etwa 730000 t Natururan produziert worden (Bild 2). Bis auf wenige 1000 t U, die Rumänien für sein Candu-Reaktorprogramm zurückbehalten hat, ist die gesamte Menge dieses strategischen Materials in die Sowjetunion verbracht worden. Davon sind etwa 300000 t U für militärische Zwecke bereitgestellt worden. Für die Kernkraftwerksprogramme der Sowjetunion und der Staaten Osteuropas sind bis heute etwas mehr als 100000 t Natururan eingesetzt worden, so dass die heutigen GUS-Staaten über einen zivilen Vorrat in Form von Natururan und angereichertem Uran in der Grössenordnung von etwa 300000 t verfügen dürften. Diese Menge entspricht etwa dem sechsfachen des derzeitigen Natururanbedarfs der westlichen Welt.

Russland hat den weitaus grössten Teil des kerntechnischen Potentials der früheren Sowjetunion geerbt. Nach vorliegenden Informationen lagert der grösste Teil des Uranvorrats in Russland. Ferner kann Russland auf beträchtliche Natururan-Lagerbestände zurückgreifen.

Nach der Auflösung der Sowjetunion als politische Einheit treten nun die uranproduzierenden GUS-Republiken Usbekistan, Kasachstan, Tadschikistan und Kirgistan als neue, unabhängige Anbieter in Erscheinung.

Diese Länder haben keine Kernkraftwerksprogramme. Ihre gesamte zukünftige Uranproduktion dürfte damit in den Export fliessen, solange die Produktionskosten durch den jeweiligen Marktpreis für Uran abgedeckt sind. Für diese Länder ist Uran eines der wenigen Handelsgüter, die unmittelbar eingesetzt werden können, um kurzfristig die dringend benötigten Devisen zu beschaffen.

Selbst unter günstigsten politischen Randbedingungen und der allgemeinen Bereitschaft westlicher EVUs, mit den Uranproduzenten der GUS-Staaten mittel- und langfristige Uranlieferverträge abzuschliessen, bliebe der mengenmässige Einfluss der Produzenten aus dieser Region voraussichtlich begrenzt. Die meisten EVUs streben eine Strategie an, nach der die Abhängigkeit von einer bestimmten Region etwa 20–25% der jährlichen Uranlieferungen nicht übersteigt. Diese Überlegungen, auf die Marktchancen der GUS-Staaten übertragen, würde bedeuten, dass die potentiellen Uranlieferungen der GUS-Staaten unter Zeitverträgen an westliche EVUs günstigstenfalls jährlich 10000 t U betragen könnten.

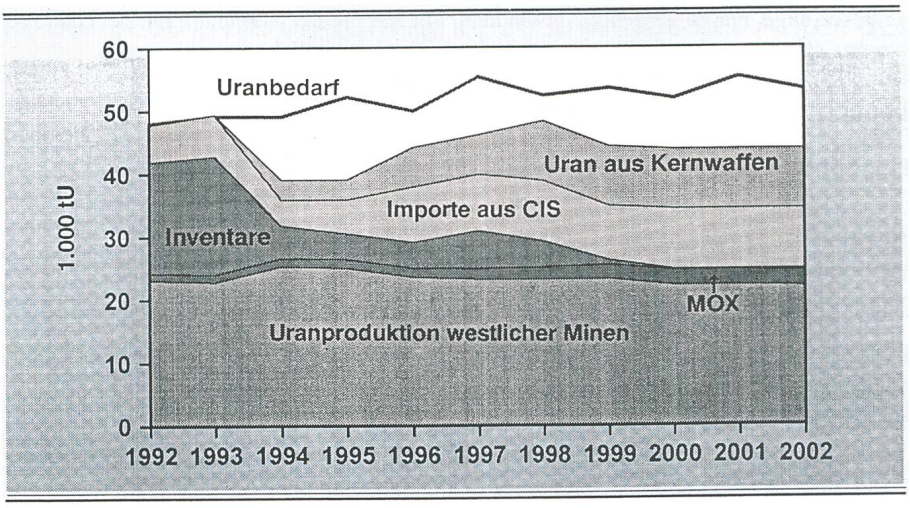


Bild 3 Uranversorgung und -bedarf der westlichen Welt

Nun zum zweiten Punkt, der potentiellen Auswirkung der internationalen Abrüstung auf den Kernbrennstoff-Kreislauf:

Die Spekulationen um die mögliche Rückführung militärischen Materials aus russischen Waffenarsenalen in den zivilen Kernbrennstoff-Kreislauf schaffen derzeit Unwägbarkeiten im Kernbrennstoffmarkt. Wenn die laufenden Verhandlungen zwischen Russland und den USA in Kürze tatsächlich erfolgreich abgeschlossen würden, könnten 500 t hochangereichertes militärisches Uran aus Russland bereits in den nächsten Jahren sukzessiv in Brennstoff für Kernkraftwerke umgewandelt, von den USA aufgekauft und in den Uranmarkt eingeführt werden. Nach der von Russland geplanten Strategie zur Umwandlung des Waffenmaterials würden über eine Laufzeit von etwa 20 Jahren insgesamt etwa 16000 t Kernbrennstoff mit einem Natururaninhalt von etwa 157000 t U an die USA geliefert. Diese Gesamtmenge entspricht in etwa dem dreifachen des derzeitigen jährlichen Natururanbedarfs der westlichen Welt.

Eines aber dürfte uns allen klar sein: An die Entrümpelung der Atomwaffenarsenale in Ost und West ist nur dann wirklich zu denken, wenn die Phase der Entspannung zwischen Ost und West anhält, was wir alle dringend hoffen.

Bild 3 verdeutlicht jedoch, dass die aus den heutigen Bezugsquellen jährlich zur Verfügung stehenden Uranmengen mittel- und längerfristig nicht ausreichen dürften, den Uranbedarf der Reaktoren der westlichen Welt zu decken. Mit anderen Worten: Aus heutiger Sicht ist unter den genannten Umständen etwa um die Mitte der 90er Jahre, spätestens aber in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts mit einer Unterversorgung zu rechnen, die durch neue Bezugsquellen gedeckt werden muss.

Diese Situation lässt früher oder später einen deutlichen Anstieg der Preise für Uran erwarten. Diese Preise werden so hoch liegen, dass sich die Investitionen in neue Uranproduktionsstätten wieder rentieren. Die Preise werden aber für die EVUs nach wie vor auf einem akzeptablen Niveau liegen, das heisst die höheren Uranpreise werden wegen des ohnehin begrenzten Anteils der Brennstoffkosten an den Stromgestehungskosten der Kernkraftwerke für die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie von untergeordneter Bedeutung bleiben.

Langfristiges Potential der Kernenergie

Uranreserven

Bezüglich des langfristigen Potentials der Kernenergie, also für die Entwicklung der Kernenergie bis weit über das Jahr 2000 hinaus, ergibt sich die grundsätzliche Frage, wie gross aus heutiger Sicht die Uranvorkommen der Welt und wie verlässlich die Angaben zu Reserven sind. Geologische Untersuchungen sind zu dem Ergebnis gekommen, dass die

Erdkruste im Mittel zu etwa 1–2 ppm aus Uran besteht. Das bedeutet, dass es auf der Erde nahezu unbeschränkte Uranmengen gibt. Die Verteilung des Urans in den verschiedenen geologischen Formationen sagt aus, dass die Menge des vorhandenen Urans auf etwa das 300fache anwächst, wenn man zu Erzen mit 10mal kleinerem Urangehalt übergeht. Für die Brennstoffversorgung von Kernkraftwerken ist deshalb entscheidend, welche Uranmengen technisch und wirtschaftlich zu gewinnen sind. Gegenwärtig werden im wesentlichen Erzkörper mit Urangehalten oberhalb von 1000 ppm abgebaut.

Die umfassendste Informationsquelle über die Uranreserven in den Ländern der westlichen Welt sind die OECD-Berichte der IAEA, zum Beispiel das Buch «Uranium Resources, Production and Demand». Dieses sogenannte «Red Book» der OECD unterteilt die Uranreserven hinsichtlich der Nachweistiefe und der Produktionskosten ein in hinreichend gesicherte Reserven, geschätzte zusätzliche Reserven und vermutete Reserven (Bild 4). Die Kostenklassen für alle Reservekategorien erstrecken sich gegenwärtig auf Produktionskosten bis 80 US-$/kg U, von 80 bis 130 US-$/kg U und von 130 bis 260 US-$/kg U.

In Bild 5 sind die hinreichend gesicherten und geschätzten zusätzlichen Reserven der Kostenklassen bis 130 US-$/kg U zusammengestellt. Sie belaufen sich gegenwärtig in den Ländern der westlichen Welt insgesamt auf etwa 4,8 Mio. t U.

Über die Uranvorkommen der Länder mit ehemals zentral gelenkten Wirtschaften liegen zum Teil neue detaillierte Informationen vor. Danach belaufen sich die hinreichend gesicherten und geschätzten Reserven der GUS, Osteuropas und Chinas auf etwa 1,3 Mio. t U. Diese Angaben erscheinen auf den ersten Blick verhältnismässig niedrig. Möglicherweise spiegeln sie den in der GUS und in der Volksrepublik China noch niedrigen Stand gezielter Prospektions- und Explorationstätigkeiten wider. Die weltweiten gesicherten und geschätzten Uranreserven, die zu 130 US-$/kg U abbaubar sind, belaufen sich somit insgesamt auf rund 6,1 Mio. t U.

Als vermutete oder auch spekulative Reserven, die bis zu 260 US-$/kg U abbaubar sind, weist das «Red Book» Vorräte zwischen 7,1 und 8,4 Mio. t U aus. Aus dem Zahlenmaterial über die GUS, Osteuropa und China errechnen sich vermutete Reserven von 2,5 bis 2,6 Mio. t U.

Fassen wir das bekannte Zahlenmaterial über die Vorräte in West und Ost zusammen, so sind etwa 16–17 Mio. t U mit Produktionskosten bis zu etwa US-$ 260/kg U gewinnbar (Bild 6). Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass für die weiteren Betrachtungen die riesigen Uranmengen im Meerwasser in der Höhe von etwa 4 Mrd. t nicht berücksichtigt werden.

Produktionskosten $ 130–$ 260/kg U	Hinreichend gesicherte Reserven	Geschätzte Reserven (Kategorie I)	Geschätzte Reserven (Kategorie II)	Vermutete Reserven
Produktionskosten $ 80–$ 130/kg U	Hinreichend gesicherte Reserven	Geschätzte Reserven (Kategorie I)	Geschätzte Reserven (Kategorie II)	Vermutete Reserven
Produktionskosten $ 80/kg U	Hinreichend gesicherte Reserven	Geschätzte Reserven (Kategorie I)	Geschätzte Reserven (Kategorie II)	Vermutete Reserven

Bild 4 NEA/IAEA-Klassifikation von Uranreserven

Produktionskosten	$ 80/kg U	$ 80–130/kg U	Summe
Westliche Welt [1)]			
Hinreichend gesicherte Reserven	1,4	0,6	2
Geschätzte zusätzliche Reserven	1,8	1	2,8
Summe			4,8
GUS, Osteuropa und VR China [2)]			
Hinreichend gesicherte Reserven	0,7		0,7
Geschätzte zusätzliche Reserven	0,6		0,6
Summe			1,3
Total			6,1

Quelle: [1)] OECD/IAEA, 1991, [2)] OECD/IAEA, 1991; Nuclear Society International, 1992

Bild 5 Gesicherte und geschätzte Uranreserven (in Mio. t U)

	Westliche Welt	GUS, Osteuropa	Summe
Hinreichend gesicherte und geschätzte zusätzliche Reserven (< $ 130/kg U)	4,8	1,3	6,1
Vermutete Reserven (< $ 260/kG U)	7,1–8,4	2,5–2,6	9,6–11,0
Summe (< $ 260/kG U)	11,9–13,2	3,8–3,9	15,7–17,1

Bild 6 Uranreserven (in Mio. t U)

		Heutiger Stand	Basisannahmen
Abbrand	GWd/t SM	37	45
Brennelementbedarf	t/GWe Jahr	20,3	16,7
Natururanbedarf	t/GWe Jahr	125,3	119
Trennarbeitsbedarf	t/GWe Jahr	103	103,2
Anreicherung	% U-235	3,35	3,84
Abreicherung	% U-235	0,2	0,2
Pu-fiss-Produktion	t/GWe Jahr	0,135	0,12
Pu-tot-Produktion	t/GWe Jahr	0,2	0,18

Bild 7 Spezifische Kernbrennstoffdaten von Leichtwasserreaktoren (Arbeitsausnutzung 68% = 248 Tage/Jahr)

Spezifischer Uranbedarf von Leichtwasserreaktoren und Einsparungspotentiale

Es stellt sich nunmehr die Frage, wie gross die Reichweite dieser 16–17 Mio. t U ist, die

	Einsparung (%)
Reduzierung der Abreicherung von 0,2 auf 0,1% U-235	14
Vollständige thermische Plutonium-Rezyklierung	20
Vollständige Rezyklierung wiederaufgearbeiteten Urans	5
Summe	39

Bild 8 Mögliche Natururan-Einsparungen

als technisch und wirtschaftlich abbaubar angesehen werden und unter bestimmten Voraussetzungen wie ökologischer Vertretbarkeit und politischer Akzeptanz für den zukünftigen Ausbau der Kernenergie verfügbar gemacht werden könnten. Die nachfolgenden Szenarien zur Beantwortung dieser Frage basieren auf einer gemeinsamen Analyse der Firmen Nukem und RWE aus dem Jahr 1990, die mit Hilfe von neuem Zahlenmaterial aktualisiert wurde.

Der Ausbau der Kernenergie wird aus heutiger Sicht bis auf weiteres im wesentlichen auf der Basis von Leichtwasserreaktoren (LWR) erfolgen. Brutreaktoren dürften erst nach 2050 einen nachhaltigen Beitrag liefern.

Für den spezifischen Brennstoffbedarf der Leichtwasserreaktoren sind heute im Mittel die in Bild 7 angegebenen Daten anzusetzen. Danach werden pro GWe und Jahr 125 t Natururan und etwa 100 t Urantrennarbeit benötigt. In diesen Daten, die auf einem Anreicherungsgrad von 0,2% und auf einem Lastfaktor von etwa 70% basieren, sind bereits die im letzten Jahrzehnt erzielten Einsparungen von Brennelement-Strukturmaterial und Gitter, axialen Natururan-Blankets, optimierten Einsatzplänen und Wechselstrategien in einer Grössenordnung bis zu 17% gegenüber Brennelementen der späten 70er Jahre berücksichtigt.

In Bild 7 sind weiterhin die spezifischen Brennstoffdaten bei Erhöhung des Entladeabbrandes von 37 auf 45 GWd/t U angegeben, wie er in den nächsten Jahren realisiert werden soll. Der Uranbedarf sinkt dadurch um weitere 5% auf knapp 120 t U pro GWe und Jahr. Für eine Betriebsdauer von 40 Jahren ergibt sich einschliesslich der Erstkernausstattung somit ein kumulierter Bedarf von rund 5300 t Natururan. Der Anreiz für diese Abbranderhöhung liegt vor allem in dem verringerten Anfall abgebrannter Brennelemente um nahezu 20%. Weitere Abbranderhöhungen bis über 50 GWd/t U mit entsprechenden Auswirkungen dürften erst nach dem Jahr 2000 realisiert werden.

Bei der Anreicherung des Urans lassen sich zusätzliche Natururaneinsparungen in Höhe von 14% durch Reduzierung des Abreicherungsgrades von 0,2 auf 0,1% U-235 erzielen (Bild 8).

Die Wiederaufarbeitung der verbrauchten Brennelemente und die thermische Rezyklierung der gewonnenen Kernbrennstoffe ermöglichen eine weitere Reduzierung der benötigten Uranmengen in der Grössenordnung von etwa 20% durch das Plutonium und von weiteren 5% durch das aufgearbeitete Uran.

Somit reduziert sich bei vollständiger Nutzung der technisch möglichen Reduzierung des Abreicherungsgrades bei der Anreicherung und der Wiederaufarbeitung mit thermischer Rezyklierung der spezifische Natururanbedarf um insgesamt 39% auf etwa 75 t U pro GWe und Jahr. Über die angenommene 40jährige Lebensdauer eines Leichtwasserreaktors bedeutet das eine Verringerung des Natururanbedarfs von 5300 auf 3100 t U (Bild 9).

Diese spezifischen Bedarfszahlen sowie die vorher erläuterten Uranreserven stellen Randbedingungen dar, die beim Ausbau der Kernenergie zu berücksichtigen sind.

Reichweite der Uranvorräte

In Bild 10 ist der kumulierte Uranbedarf in Abhängigkeit von der kumulierten installierten LWR-Kapazität bei einer Lebensdauer

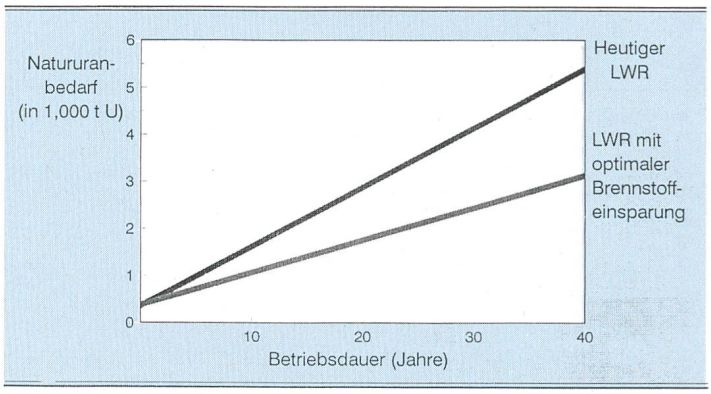


Bild 9 Kumulierter Natururanbedarf eines 1000-MWe-LWR in Abhängigkeit von der Betriebsdauer

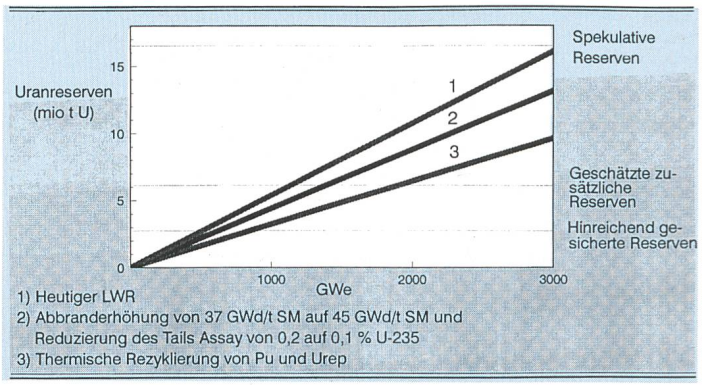


Bild 10 Kumulierter Natururanverbrauch in Abhängigkeit von der installierten KKW-Kapazität (KKW-Betriebsdauer: 40 Jahre)

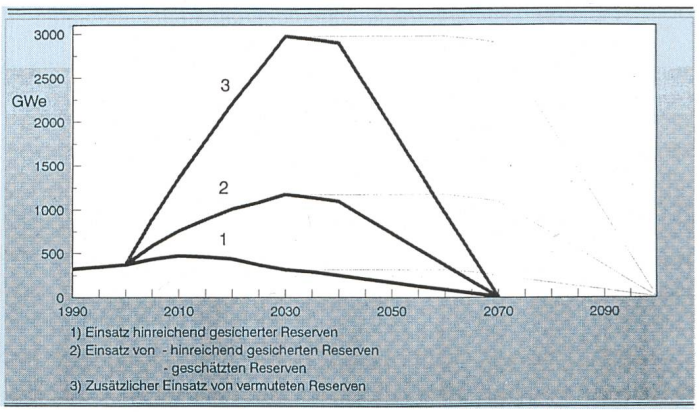


Bild 11 Installierte Kernkraftwerkskapazität in Abhängigkeit der verwendeten Uranreserven (Basis: maximale Reduzierung des Brennstoffeinsatzes)

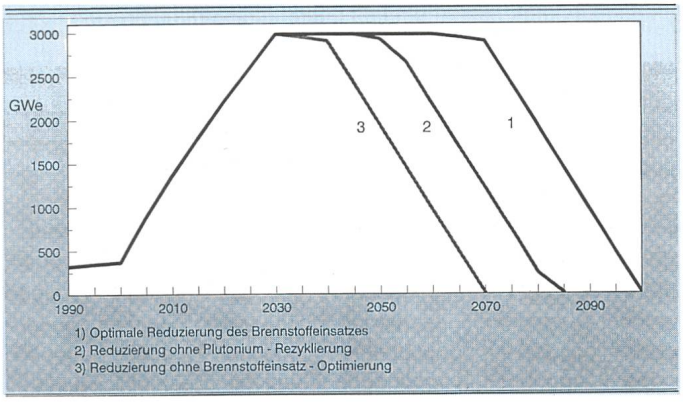


Bild 12 Installierte Kernkraftwerkskapazität in Abhängigkeit der verwendeten Uranreserven (Basis: Ersatz stillgelegter LWR durch Brutreaktoren)

der Kraftwerke von 40 Jahren den Uranreserven gegenübergestellt. Kurve 1 zeigt den Uranbedarf mit der derzeitigen Brennelemente-Auslegung. Kurve 2 unterstellt den reduzierten Uranbedarf, der sich aus der Erhöhung des Abbrandes und aus der weiteren Abreicherung des Natururans ergibt. Kurve 3 zieht zusätzlich die Wiederaufarbeitung und die thermische Rezyklierung der Reststoffe Plutonium und Uran mit in Betracht.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass mit den heute hinreichend gesicherten Reserven etwa 500 GWe über eine Betriebsdauer von 40 Jahren mit Uran versorgt werden können.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die gegenwärtige Ausbauplanung eine Kernkraftwerksleistung von rund 370 GWe weltweit für das Jahr 2000 erwarten lässt. Bei Realisierung der vorgenannten Einsparungsmöglichkeiten könnten mit den hinreichend gesicherten Reserven rund 800 GWe 40 Jahre oder die geplante Kraftwerksleistung des Jahres 2000 rund 86 Jahre lang betrieben werden. Berücksichtigt man die geschätzten zusätzlichen Reserven, so wäre aus der Sicht der Uranversorgung ein LWR-Programm von knapp 1300 bzw. 2000 GWe möglich. Mit den vermuteten Reserven wäre sogar ein LWR-Programm von etwa 3000 bzw. 5200 GWe möglich.

Ein verstärkter Ausbau der Kernenergie, der deutlich über das Ausbauprogramm des Jahres 2000 hinausgeht, setzt also voraus, dass mindestens auch die geschätzten zusätzlichen Uranreserven für die Brennstoffversorgung verfügbar gemacht werden (Bild 11). Einen möglichen zeitlichen Verlauf eines solchen verstärkten Zubaus zeigt die Kurve 2. Danach steigt die installierte Kernkraftwerks-Kapazität bis zum Jahre 2030 auf knapp 1300 GWe und geht dann bis zum Jahre 2070 kontinuierlich auf Null zurück. Unter Berücksichtigung aller vorher geschilderten Möglichkeiten zur Reduzierung des Brennstoffbedarfs könnte eine solche Kapazität von knapp 1300 GWe jedoch weitere 30 Jahre bis etwa 2060 aufrechterhalten werden.

Zieht man die vermuteten Reserven, das heisst insgesamt die erwähnten rund 16 bis 17 Mio. t U in diese Betrachtungen mit ein und geht man wiederum davon aus, dass bis zum Jahre 2030 das Maximum an installierter Leistung erreicht wird, so würde sich ein zeitlicher Verlauf an installierter Leistung gemäss Kurve 3 ergeben. Man würde um das Jahr 2030 eine maximale installierte Kapazität von rund 3000 GWe erreichen können. Eine solche Kapazität könnte dann bei Nutzung der geschilderten Einsparungsmöglichkeiten im Brennstoffverbrauch wiederum über weitere 30 Jahre aufrechterhalten werden und würde danach ebenfalls bis zum Jahre 2100 bis auf Null zurückfallen.

Soll dagegen eine Kernkraftwerks-Kapazität von 1300 GWe bzw. von 3000 GWe langfristig, das heisst über das Jahr 2060 hinaus, aufrechterhalten werden, so ist das nur mit dem Einsatz fortgeschrittener Reaktortechnologien möglich (Bild 12).

Für den Erstkern eines Brutreaktors mit 1 GWe Leistung wird etwa soviel Plutonium benötigt wie ein Leichtwasserreaktor mit 1 GWe über die gesamte Lebensdauer von 40 Jahren erzeugt, also etwa 6 t spaltbaren Plutoniums (Pu-fiss). Das heisst aber andererseits, in erster Näherung, dass auf die thermische Rezyklierung fast vollständig verzichtet werden müsste, wenn eine bestimmte Kapazität von Leichtwasserreaktoren sukzessive vollständig durch Brutreaktoren ersetzt werden soll.

Gemäss Bild 12 wären jährlich etwa 80 GWe zuzubauen und später durch Brüter zu ersetzen. Wegen des beträchtlichen Pu-Bedarfs für ein solches Brüterprogramm müsste vorzeitig die thermische Rezyklierung von Plutonium eingeschränkt und möglichst viel Plutonium für die Brüter-Erstkerne vorgehalten werden. Daraus ergibt sich nun wiederum effektiv eine Reduzierung des für die Leichtwasserreaktoren zur Verfügung stehenden Brennstoffs, so dass spätestens bereits ab 2030 ein umfangreiches Brüterprogramm starten müsste, um stillzulegende LWR-Anlagen zu ersetzen.

Es ist also festzuhalten: je grösser der Beitrag sein soll, den die Kernenergie zur Dekkung des Elektrizitätsbedarfs und zur Lösung des CO_2-Problems beitragen soll, desto früher wird der Einsatz der Brütertechnologie erforderlich.

Auswirkung von KKW-Zubauprogrammen auf den Kernbrennstoff-Kreislauf

Als nächstes wäre die Frage nach den Auswirkungen auf die einzelnen Schritte des Brennstoffkreislaufs zu stellen. Die erforderlichen Kapazitäten für den Kernbrennstoff-Kreislauf für beide Szenarien – Ausbau auf nahezu 1300 GWe und Ausbau auf 3000 GWe bis zum Jahre 2030 – sind in Bild 13 zusammengestellt. Zum Vergleich sind die heute vorhandenen Kapazitäten angegeben. Im Falle des Szenarios 2 müsste die Uranproduktionskapazität von gegenwärtig rund 52 000 t U/a auf 100 000–150 000 t U/a gesteigert werden. Die Anreicherungskapazitäten müssten auf insgesamt 130 000 bis 140 000 t UTA ausgebaut werden. Fertigungsanlagen für LWR-Brennelemente müssten auf 22 000 t SM ausgebaut werden.

Soll die Kernkraftwerks-Kapazität längerfristig durch den Übergang auf die Brütertechnologie aufrechterhalten werden, so

	Vorhanden	Szenario 2		Szenario 3	
		Basis-annahmen	Einsparungen + Rückführung	Basis-annahmen	Einsparungen + Rückführung
Uranproduktion (t U/a)	52 000	157 000	100 000	362 000	226 000
Urankonversion (t U/a)	55 000	156 000	99 000	360 000	225 000
Urananreicherung (t UTA/a)	45 000	130 000	140 000	300 000	320 000
BE-Fertigung (LWR) (t/a)	16 000	22 000	22 000	50 000	50 000
– davon MOX-BE (t/a)	60		4 400		10 000
– davon Urep-BE (t/a)	0		1 100		2 500
Wiederaufarbeitung (t/a)	1 900		22 000		50 000

Bild 13 Erforderliche Kapazitäten im Kernbrennstoff-Kreislauf, Szenario 2 und 3

sind die Voraussetzungen für die Aufarbeitung des gesamten anfallenden Brennstoffs, das heisst bis zu rund 22000 t SM jährlich zu schaffen. Bei der Standardgrösse heutiger kommerzieller Wiederaufarbeitungsanlagen von 800 t SM/a entspräche das etwa 30 Wiederaufarbeitungsanlagen. Dieses scheint zunächst technisch machbar.

Ein Ausbau der Kernenergie auf LWR-Basis auf etwa 1300 GWe unter dem Aspekt der Versorgung mit Brennstoff und der Entsorgung erscheint technisch somit durchaus realisierbar.

Aus technischer Sicht wesentlich kritischer zu beurteilen ist das Szenario 3 mit einer Kernkraftwerksleistung von 3000 GWe, die bis zum Jahre 2030 zu installieren wäre. Die Uranproduktion müsste in diesem Fall auf jährlich 225000–360000 t U erhöht werden. Abgesehen von den wirtschaftlichen, ökologischen und politischen Schwierigkeiten könnten Uranreserven in einem solchen Umfang sicherlich nur mit sehr grossen Anstrengungen verfügbar gemacht werden. Das gleiche gilt für die erforderlichen Anreicherungskapazitäten, die notwendigen Brennelement-Fertigungsanlagen und insbesondere für Wiederaufarbeitungskapazitäten von ebenfalls rund 50000 t SM/a, was etwa 60 Wiederaufarbeitungsanlagen entsprechen würde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das zweite Szenario mit einem Ausbau der Kernkraftwerksleistung bis zu 1300 GWe im Jahre 2030 überwiegend auf LWR-Basis realisierbar erscheint. Ausreichende Uranvorräte sind bekannt und könnten verfügbar gemacht werden. Auf der Basis ausgereifter vorhandener Techniken sollten die erforderlichen Kapazitäten im Brennstoff-Kreislauf erstellt werden können. Das dritte Szenario mit einem Ausbau bis zu 3000 GWe im Jahre 2030 erscheint dagegen nur unter äussersten technischen Anstrengungen realisierbar. Es erfordert ausserdem den vorzeitigen verstärkten Zubau von Brutreaktoren. Inwieweit solche Überlegungen die Akzeptanz der Politik und der Öffentlichkeit finden würden, soll hier nicht beurteilt werden.

Thorium-Reserven

Nachfolgend wird ein kurzer Blick auf den Brennstoffkreislauf des Hochtemperaturreaktors (HTR) geworfen.

Die bekannten Thoriumreserven allein der Länder der westlichen Welt betragen etwa 3,3 Mio. t. Im Falle des geschlossenen Brennstoffkreislaufes hat ein HTR-Kernkraftwerk mit einer Leistung von 1 GWe einen jährlichen Nachladebedarf von etwa 13 t Th, zuzüglich geringerer Mengen angereicherten Urans. Selbst wenn man die theoretisch denkbare Rezyklierung des aus der Wiederaufarbeitung zurückgewonnenen Thoriums ausser acht lässt, zeigt sich, dass die derzeit bekannten Thoriumreserven ausreichen würden, eine installierte HTR-Kapazität von mehr als 6000 GWe über 40 Jahre mit Thorium zu versorgen.

Dieser einfache Vergleich soll an dieser Stelle lediglich belegen, dass unter Einsatz wesentlicher finanzieller Mittel und projektbegleitender Forschung grundsätzlich auch der Hochtemperaturreaktor einen ganz wesentlichen Beitrag zur zukünftigen Stromerzeugung beitragen könnte.

Ausblick

Abschliessend ist die Frage zu beantworten, welche globale Bewertung den diskutierten Szenarien zukommt.

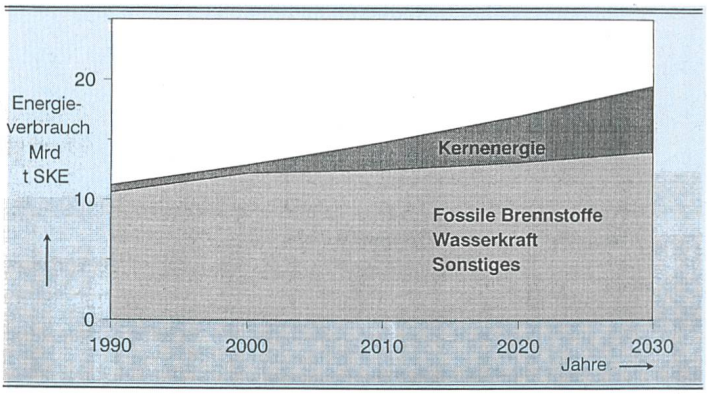
Im Jahre 1990 lebten auf der Welt etwa 5,1 Mrd. Menschen mit einem weltweiten Primärenergieverbrauch von 11,2 Mrd. t SKE. Für das Jahr 2020 wird eine Weltbevölkerung von etwa 7,8 Mrd. Menschen geschätzt, deren Primärenergieverbrauch bei etwa 17 Mrd. t SKE liegen wird. Dies entspräche einem mittleren jährlichen Anstieg des Primärenergieverbrauchs von etwa 1,5% bei einem gleichzeitigen leichten Rückgang des mittleren Pro-Kopf-Energieverbrauchs.

Bei Ausweitung der Kernenergie auf 3000 GWe im Jahre 2030 würde der Anteil der Kernenergie am Primärenergieeinsatz auf nahezu 30% ansteigen (Bild 14).

Der Einsatz fossiler Brennstoffe, von Wasserkraft und sonstigen Primärenergien wäre zwar prozentual gesehen rückläufig, in absoluten Werten aber würde er – wenn auch nur leicht – weiter ansteigen.

Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen: selbst ein so ambitioniertes Kernkraftwerksprogramm wie in dem dargestellten Szenario könnte die Menge des jährlichen CO_2-Ausstosses bestenfalls konstant halten. Weitere begleitende Massnahmen zur Einschränkung der emittierten CO_2-Mengen sind daher dringend erforderlich.

Bild 14 Anteil der Kernenergie am Weltenergieverbrauch (Basis: 3000 GWe im Jahr 2030)



Réserves et potentiel de l'énergie nucléaire

Potentiel du développement technique et réserves de combustible pour la production d'électricité d'origine nucléaire

Si la production d'énergie nucléaire venait à être augmentée à 3000 GWe d'ici à l'an 2030, la part de l'énergie nucléaire dans l'utilisation de l'énergie primaire atteindrait près de 30%. Même en réalisant un programme nucléaire aussi ambitieux, il serait possible de maintenir constante la quantité annuelle de CO_2 rejetée dans l'atmosphère. Qu'en est-il toutefois des réserves de combustible nucléaire à court, à moyen et à long terme? Quels mesures et développements techniques influencent de manière déterminante les réserves et le potentiel de la production d'électricité d'origine nucléaire? En ce qui concerne le potentiel à long terme (bien au-delà de l'an 2000) de l'énergie nucléaire, la question fondamentale qui se pose est de savoir quelle est la taille actuelle des gisements d'uranium et quelle est la fiabilité des données concernant les réserves.