

**W**

**Deutscher Bundestag ■ Wissenschaftliche Dienste**

## **Uran als Kernbrennstoff: Vorräte und Reichweite**

- INFO-BRIEF -

**Dr. Daniel Lübbert, Prakt. Felix Lange**

## **Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages**

Verfasser/in: Dr. Daniel Lübbert, Prakt. Felix Lange

Uran als Kernbrennstoff: Vorräte und Reichweite

INFO-BRIEF WF VIII G - 069/06

Abschluss der Arbeit: 27.03.2006

Fachbereich VIII: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit,  
Bildung und Forschung

Ausarbeitungen und andere Informationsangebote der Wissenschaftlichen Dienste geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Die Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste sind dazu bestimmt, Mitglieder des Deutschen Bundestages bei der Wahrnehmung des Mandats zu unterstützen. Der Deutsche Bundestag behält sich die Rechte der Veröffentlichung und Verbreitung vor. Diese bedürfen der Zustimmung des Direktors beim Deutschen Bundestag.

## **Inhalt**

<b>1.</b>	<b>Einleitung: Uran als Rohstoff für die Energieversorgung</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Der Brennstoffkreislauf</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Reserven, Ressourcen und Reichweite</b>	<b>5</b>
3.1.	Uranabbau	5
3.2.	Reserven und Ressourcen	7
3.3.	Statische Reichweite	8
3.4.	Weitere Einflussfaktoren; genauere Abschätzungen der Reichweite	10
<b>4.</b>	<b>Diskussion und Zusammenfassung</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>Quellen und Literaturangaben</b>	<b>15</b>

## 1. Einleitung: Uran als Rohstoff für die Energieversorgung

Die aktuelle energiepolitische Debatte nicht nur in Deutschland wird dominiert von zwei Problemkreisen: der Begrenztheit und drohenden Erschöpfung der Reserven an fossilen Energieträgern einerseits, und der Schädigung der Erdatmosphäre und des Klimas durch Verbrennungsabgase andererseits. Während die bekannten Vorräte an Öl und Gas bei anhaltendem Verbrauch innerhalb einiger Jahrzehnte verbraucht sein könnten (BMWi/BMU 2006), ist die Verbrennung der noch in größeren Mengen vorhandenen Kohle sehr CO<sub>2</sub>-intensiv und gilt daher als besonders klimaschädlich. Zwar könnten erneuerbare Energien (Wind- und Wasserkraft, Solarenergie, Geothermie und Biomasse) einen Ausweg aus diesem Problem darstellen, da sie praktisch unerschöpflich und gleichzeitig klimaneutral sind. Jedoch wird verschiedentlich darauf hingewiesen, dass die Kapazitäten für eine Energieversorgung aus erneuerbaren Energien gegenwärtig nicht ausreichen und eine kurzfristige Aufstockung der Kapazitäten technologisch und vor allem finanziell sehr aufwändig wäre.

In diesem Spannungsfeld wird von manchen Beobachtern der verstärkte Rückgriff auf die Kernenergie als eine ideale Zwischenlösung vorgeschlagen (siehe z.B. DPG 2005). In Ländern wie Indien und China, Russland, Finnland und Frankreich werden Neubauten von Kernkraftwerken erwogen oder sind bereits beschlossen. Auch in Deutschland wird zumindest eine Verlängerung der Laufzeiten der existierenden Kraftwerke – der „Ausstieg aus dem Ausstieg“ – verstärkt diskutiert. Dabei spielt auch die Frage eine Rolle, inwieweit die Versorgung der Kraftwerke mit Uran als „Kernbrennstoff“<sup>1</sup> über längere Zeiträume gesichert ist als diejenige mit Öl und Gas. Im Zusammenhang der Versorgungssicherheit wird auch oft betont, dass die weltweiten Uranvorräte mehrheitlich in Ländern wie Kanada oder Australien liegen, die politisch wesentlich stabiler erscheinen als viele Ölförderstaaten. Die Frage der Uranvorräte hat auch in der politischen Diskussion immer wieder eine Rolle gespielt, bei Debatten im Bundestag zum Atomausstieg (siehe beispielsweise BT-Drs. 14/3667, 14/4569, 15/4155 sowie Plenarprotokolle 14/61 und 15/152) ebenso wie bei der Vorbereitung des Energiegipfels der Bundesregierung im April 2006 (BMWi/BMU 2006).

In diesem Zusammenhang dient der vorliegende Beitrag dazu, den aktuellen Kenntnisstand über die weltweiten Uranvorräte darzustellen. Andere Themen – wie z.B. Fragen der Betriebssicherheit, der Endlagerung, der Wirtschaftlichkeit auch ohne staatliche Kofinanzierung sowie der Unabhängigkeit der nationalen Energieversorgung von Rohstoffimporten – spielen zwar in der energiepolitischen Diskussion um die Kernkraft eine nicht minder wichtige Rolle. Diese Fragen sollen aber hier weitgehend ausgeklammert

---

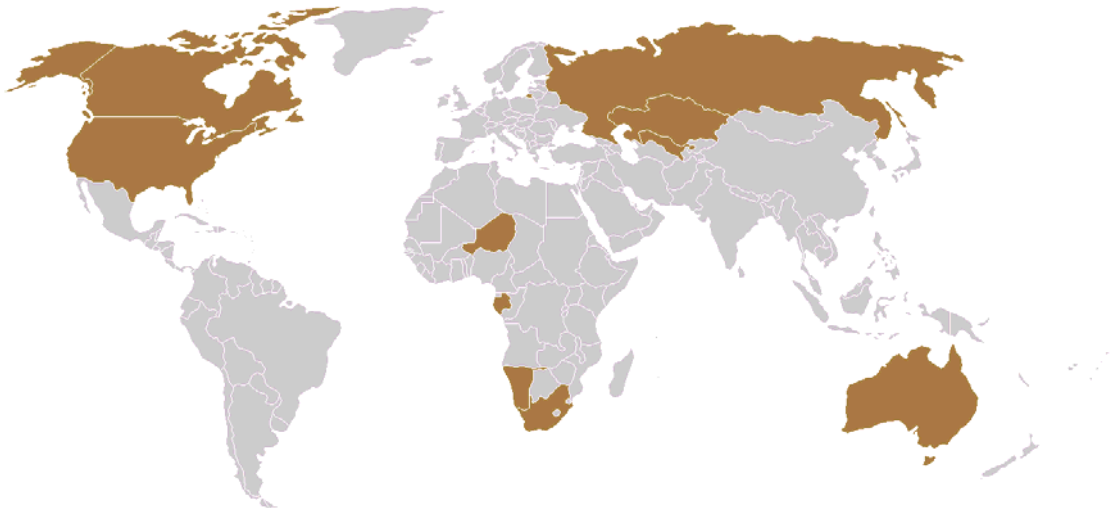
1 Da in einem Kernkraftwerk kein chemischer Verbrennungsprozess, sondern vielmehr ein Kernspaltungsvorgang abläuft, müsste man genauer von spaltbarem Material statt von „Brennstoff“ sprechen.

bleiben. Der Beitrag konzentriert sich auf den derzeitigen Wissensstand um die Vorräte an Uran sowie den daraus berechenbaren voraussichtlichen Zeitrahmen bis zur Erschöpfung der Vorräte („Reichweite“).

## 2. Der Brennstoffkreislauf

Damit Uran als Kern-„Brennstoff“ in Kraftwerken eingesetzt werden kann, muss es in einem mehrstufigen Prozess zu Brennstäben und Brennelementen verarbeitet werden. Zuvor müssen zunächst abbauwürdige Vorkommen von Uran in der Natur aufgespürt und durch bergbauliche Aktivitäten erschlossen werden. Chemisch ist Uran ein Schwermetall, jedoch kommt es in der Natur praktisch nicht in reiner (metallischer) Form vor, sondern meist in Verbindung mit anderen Elementen (Sauerstoff, Silizium) in Mineralien gebunden. Die in Bergwerken abgebauten uranhaltigen Gesteine müssen daher nach ihrer Förderung zunächst vom Wirtsgestein getrennt und chemisch aufbereitet werden (so genannte „Konversion“). Die verschiedenen Lagerstätten weisen dabei sehr unterschiedliche Gehalte an Uran pro Kilogramm Gestein auf. Je niedriger der Urananteil, desto aufwändiger ist der Konversionsprozess.

Nach Abschluss der Konversion ist das Uran (U) zwar chemisch rein, besteht jedoch immer noch aus zwei kernphysikalisch verschiedenen Atomsorten (Isotopen): dem spaltbaren, leichteren  $^{235}\text{U}$  und dem für die Kernspaltung nicht nutzbaren, schwereren  $^{238}\text{U}$ . Im natürlich vorkommenden Urangemisch liegt der Anteil des nutzbaren Isotops



**Abbildung 1: Karte der wichtigsten Uran-Förderländer. Die zehn farblich markierten Staaten tragen zu 94% zur weltweiten Urangewinnung bei. Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran> [Stand 07.03.2006].**

$^{235}\text{U}$  bei nur 0,7% gegenüber 99,3% an  $^{238}\text{U}$  – dies gilt praktisch einheitlich für alle Lagerstätten weltweit. Für den Gebrauch in kommerziellen Leichtwasserreaktoren muss sein Anteil auf etwa 3-5 % gesteigert werden („Anreicherung“). Dies kann dadurch realisiert werden, dass das Uran zunächst chemisch in gasförmiges Uranhexafluorid ( $\text{UF}_6$ )



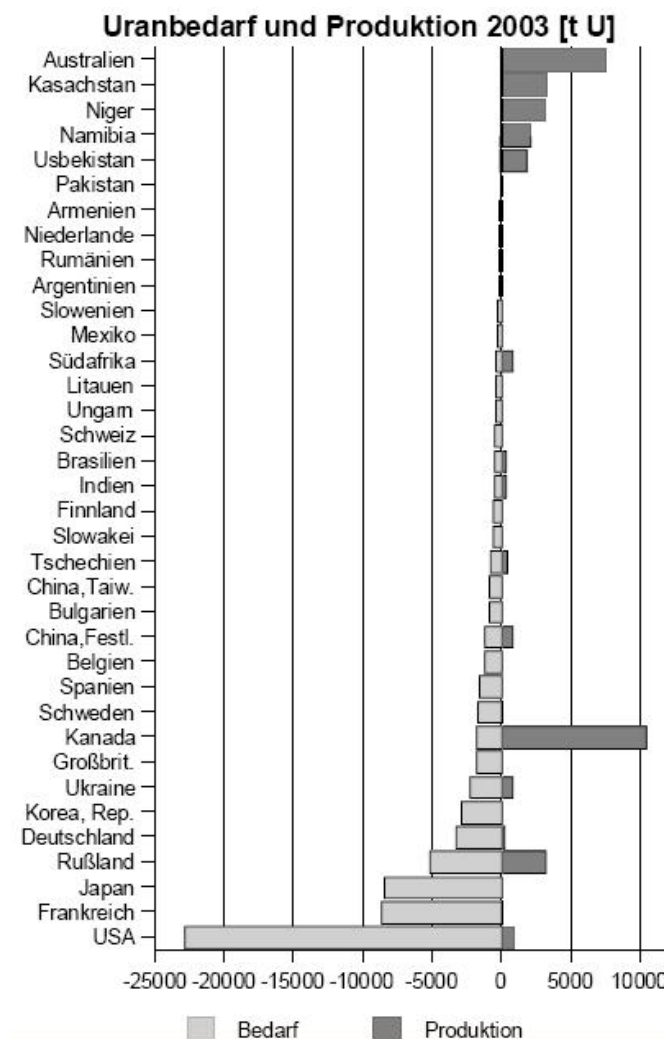
umgewandelt wird. Danach wird dieses Gas in Gasultrazentrifugen schrittweise in die leichteren und schwereren Bestandteile getrennt. Im Anschluss daran wird das angereicherte Uran erneut chemisch zu Uranoxid umgewandelt und dadurch wieder in feste Form gebracht, zu Brennelementen verarbeitet und kann dann in Kraftwerken eingesetzt werden. Danach folgen eine mögliche Wiederaufarbeitung und/oder die Zwischen- bzw. Endlagerung.

### 3. Reserven, Ressourcen und Reichweite

#### 3.1. Uranabbau

Vorkommen von Uranerz im Boden sind aus allen Kontinenten bekannt (siehe Abbildung 1). Die größten Uran-Förderländer sind derzeit Kanada, Australien, Kasachstan, Niger und Russland (siehe Abbildung 2). Weitere Produzenten sind unter anderem Namibia, Südafrika, Usbekistan, die Ukraine sowie Gabun, Brasilien und Tschechien. Die USA haben ebenso wie Russland und China zwar eine eigene Uran-Produktion, verbrauchen jedoch selbst mehr als sie produzieren und sind daher Netto-Importeure von Uran. Weitere Großverbraucher wie Frankreich, Japan, Deutschland und Großbritannien haben praktisch keine eigene Produktion und sind ganz auf Importe angewiesen (BGR 2004).

Auch in Deutschland gibt es Vorkommen von Uranerz. Sowohl in West- als auch in Ostdeutschland wurde früher Uranbergbau betrieben. Während die Förderung beispielsweise im Schwarzwald eher



**Abbildung 2: Uran-Verbrauch (Balken nach links) und Produktion (Balken nach rechts) ausgewählter Länder in Tonnen Uran pro Jahr (Stand 2003). Darstellung aus Greenpeace (2005); Zahlenwerte in Übereinstimmung mit dem „Red Book“ (NEA/IAEA 2004, Fig. 10, S. 54).**

geringen Umfang hatte, trug der Abbau durch die Wismut AG („Sowjetisch-Deutsche Aktiengesellschaft Wismut“) in Sachsen und Ost-

thüringen in nicht unerheblichem Maße zur damaligen Weltproduktion an Uran bei. Alle Minen wurden ab 1990 geschlossen; heute findet in Deutschland kein Uranabbau mehr statt. Gründe für die Schließung waren Unwirtschaftlichkeit, zurückgehender Uranbedarf nach dem Ende des Kalten Krieges sowie die Folgeschäden des Uranbergbaus für die Umwelt, deren Beseitigung noch heute nicht abgeschlossen ist. Die Unwirtschaftlichkeit des deutschen Uranabbaus war dabei unter anderem durch den relativ geringen Urangehalt im Erz bedingt. Generell gilt, dass die Urangewinnung aus niedriger konzentrierten Erzen („Armerz“) nicht nur aufwändiger ist, sondern auch mehr (radioaktiven) Abraum verursacht, der potenziell umweltgefährdend ist.

In den 1960er und 1970er Jahren haben viele Länder umfangreiche Aktivitäten zur Erkundung und bergbaulichen Erschließung von Uranvorkommen entfaltet. Die jährliche Fördermenge stieg dadurch deutlich über den Jahresverbrauch, wodurch bis etwa 1985 steigende Vorräte an Uran angehäuft wurden – sowohl für den militärischen Bedarf als auch zum Zwecke der Bildung von strategischen Reserven für die Energiegewinnung. Nach dem Ende des Kalten Krieges wurden die Reserven stark reduziert; als ein Beitrag zur Abrüstung wurde auch stärker angereichertes, waffenfähiges Uran wieder teilweise abgereichert und in zivilen Kernkraftwerken zur Stromproduktion eingesetzt. Dadurch entwickelte sich ein Überangebot auf dem Uranmarkt, das einen Preisverfall und einen starken Rückgang der bergbaulichen Aktivitäten zur Folge hatte. Auch heute noch stammt ein erheblicher Anteil des jährlichen Uranverbrauchs aus ehemaligen militärischen Beständen. Die Jahresproduktion von Natururan lag im Jahr 2004 mit 40.657 Tonnen deutlich unter dem Verbrauch von 68.000 Tonnen (BGR 2004). Diese Situation wird sich jedoch nach Expertenmeinung in nächster Zeit verändern, wenn die militärischen Bestände weitgehend abgebaut sein werden (Max 2005). Es wird daher vielfach darauf hingewiesen, dass für eine weitere Nutzung der Kernkraft eine baldige Steigerung der Kapazitäten im Uranbergbau unabdingbar ist<sup>2</sup> (Max 2005).

Im Hinblick auf die gesamte Verwertungskette von Uran – vom Abbau über Konversion und Anreicherung bis hin zur Brennelementherstellung – ist darauf hinzuweisen, dass an den verschiedenen Verarbeitungsschritten nicht nur die oben genannten Produzenteländer, sondern auch weitere Staaten beteiligt sind. So existiert zwar in Deutschland kein Uranbergbau mehr. Jedoch betreibt die Firma Urenco neben Anlagen in Großbritannien und den Niederlanden auch im westfälischen Gronau eine Anreicherungsanlage, deren Kapazität für die Versorgung von 13 großen Kernkraftwerken<sup>3</sup> ausreicht. Anlagen zur Herstellung von Brennelementen sind wiederum in teilweise anderen Staaten anzu-

---

2 Kritiker der Kernkraft wenden in diesem Zusammenhang ein, dass ein gesteigerter Uran-Bergbau auch zu stark steigenden Umweltschäden führen würde, insbesondere wenn zunehmend auch Armerzlagernstätten erschlossen würden, bei denen größere Mengen an radioaktivem Abraum anfallen (Greenpeace 2005).

3 Quelle: <http://www.urencode> [Stand 16.03.2006]

treffen, so neben Frankreich (Firmen Cogéma und Framatome) und Deutschland (Firma Siemens) auch in den USA, Russland, Japan und Kasachstan (Greenpeace 2005).

Als eine weitere denkbare Uranquelle sei erwähnt, dass auch im **Meerwasser** Spuren von Uran vorhanden sind. Wegen des enormen Wasservolumens in den Weltmeeren ist die darin enthaltene Gesamtmenge an Uran so groß, dass der weltweite Energiebedarf damit theoretisch sehr lange gedeckt werden könnte. Jedoch ist die Konzentration an Uran mit etwa 3 Mikrogramm pro Liter Meerwasser äußerst gering. Die Gewinnung von Uran aus dem Meerwasser wäre daher technisch und finanziell extrem aufwändig und wird derzeit nicht ernsthaft in Betracht gezogen.

### 3.2. Reserven und Ressourcen

In der Fachliteratur werden die Vorkommen an Uran – ebenso wie bei vielen anderen Rohstoffen – in unterschiedliche Kategorien eingeteilt<sup>4</sup>. Als **Reserven** bezeichnet man denjenigen Anteil der bekannten Vorkommen, die nach heutigem Stand der Bergbau-Technologie und zu heutigen Marktpreisen wirtschaftlich gewinnbar wären, d. h. deren Abbau für Bergbauunternehmen bereits heute profitabel wäre (Framatome 2005). Über die bekannten bzw. „hinreichend gesicherten Vorkommen“ (engl. „reasonably assured resources“ – RAR) hinaus gibt es weitere so genannte **Ressourcen**. Diese werden unterteilt in „geschätzte zusätzliche Vorräte“ (engl. „estimated additional resources“ – EAR) der Kategorien I und II sowie die „spekulativen“ (vermuteten) Ressourcen. Kategorie I bezeichnet dabei die Vorkommen in bekannten Lagerstätten, deren Umfang noch nicht durch Bohrungen genau erkundet ist, so dass die in ihnen enthaltene Uranmenge nur geschätzt werden kann. In Kategorie II fallen Lagerstätten, deren Vorhandensein im Umfeld bekannter Vorkommen vermutet wird, die aber noch nicht direkt nachgewiesen sind. Der Begriff „spekulative Ressourcen“ schließlich bezeichnet Uranvorkommen, deren Vorhandensein einige Länder allein aufgrund der allgemeinen geologischen Beschaffenheit ihres Staatsgebietes annehmen, ohne dass diese Vorkommen bisher genauer lokalisiert worden wären.

Oft werden die ersten beiden Gruppen – d. h. die „hinreichend gesicherten Vorräte“ und die „geschätzten zusätzlichen Vorräte der Kategorie I“ – noch unter dem Begriff der **bekanntes konventionellen Vorräte** (engl. „known conventional resources“ – KCR) zusammengefasst. Die „geschätzten zusätzlichen Vorräte der Kategorie II“ sowie die „spekulativen Ressourcen“ werden analog als **unentdeckte konventionelle Vorräte** (engl. „undiscovered conventional resources“) zusammengefasst (NEA/IAEA 2004, S.

---

4 Für eine Kurzeinführung siehe beispielsweise Framatome (2005). Eine ausführlichere Darstellung findet sich im „Annex 3“ des „Red Book“ (NEA/IAEA 2004). Dort wird auch die in verschiedenen Uran-Förderländern teilweise stark unterschiedliche Terminologie verglichen und auf eine gemeinsame Basis bezogen.



262). Die oben erwähnten Uranvorkommen im Meerwasser wären nach dieser Einteilung ein Beispiel für „unkonventionelle“ Vorräte (NEA/IAEA, S. 261).

Neben dieser Unterteilung nach dem Grad der Bekanntheit bzw. der bergbaulichen Erkundung werden die Uranvorkommen zusätzlich eingeteilt nach den voraussichtlichen **Kosten des Abbaus** (in US-Dollar pro Kilogramm Uran). Üblicherweise erfolgt dabei eine Unterteilung in drei Kosten-Klassen: eine niedrige (bis 40 \$/kg), eine mittlere (bis 80 \$/kg) und eine hohe (bis 130 \$/kg). Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine solche Unterteilung nach Kosten meist nur für die bekannten Vorräte möglich ist. Für die noch unbekanntes „spekulativen“ Ressourcen werden üblicherweise nur kumulierte Zahlen für alle Kostenkategorien zusammen angegeben. Vorräte, deren Gewinnungskosten noch oberhalb von 130 \$/kg liegen, werden als derzeit nicht abbaubar angesehen und gehen nicht in die Berechnung der (konventionellen) Ressourcen ein.

Zahlenwerte für die angenommenen Mengen an Uranvorräten, aufgefächert nach Bekanntheitsgrad einerseits und Kostenkategorien andererseits, sind in Tabelle 1 angegeben. Dabei wurde der Übersichtlichkeit halber auf die Angaben zur mittleren Preiskategorie verzichtet und nur zwischen Preisobergrenzen von 40 und 130 \$/kg unterschieden. Zum Vergleich mit diesen Zahlen ist erwähnenswert, dass im gesamten Zeitraum seit Beginn der Uranförderung bis zum Jahr 2002 weltweit etwas mehr als 2 Millionen Tonnen Uran gefördert wurden (Heinloth 2003, Framatome 2005).

Während bei der derzeitigen Uranproduktion Kanada mit einem Anteil von 28,5% an der weltweiten Förderung vor Australien (23,1%), Kasachstan (9,1%) und Niger (8,1%) liegt, stellen sich die Verhältnisse bei den verbleibenden Vorräten teilweise umgekehrt dar. Hier liegen in praktisch allen Kategorien Australien an erster Stelle (41% der Reserven) und Kasachstan an zweiter Stelle. Danach folgen bei den bekannten Vorräten Kanada und Südafrika, die jedoch bei den geschätzten zusätzlichen Vorräten noch von Niger und Russland übertroffen werden (siehe BGR 2004, S. 25/68).

### 3.3. Statische Reichweite

Teilt man die so bestimmte Menge an bekannten oder vermuteten Uranvorräten durch den gegenwärtigen jährlichen Brennstoffverbrauch<sup>5</sup> aller Kernreaktoren weltweit, so erhält man im Ergebnis eine Jahreszahl, die in der Fachliteratur als **statische Reichweite** bezeichnet wird. Sie gibt an, nach wie vielen Jahren die zugrunde gelegte Menge an Uranvorräten erschöpft wäre, wenn der jährliche Verbrauch auf dem gegenwärtigen Niveau fortgeführt wird. Diese Größe ist zusätzlich zur Menge an Vorräten in Tabelle 1 für jede Vorrats-Kategorie mit angegeben.

---

5 Die weltweit 440 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke mit einer gesamten elektrischen Leistung von 359.900 Megawatt verbrauchten im Jahr 2004 zusammen 68.357 Tonnen Uran (BGR 2004).

Art der Vorräte	Zum gegenwärtigem Marktpreis (40 \$/kg) abbaubare Vorräte		Zu einem Preis von max. 130 \$/kg abbaubare Vorräte	
	Reserven (hinreichend gesicherte Vorräte) (engl. "Reasonably assured resources" - RAR)	Menge: Reichweite:	1.730.000 t 25 Jahre	Menge: Reichweite:
Reserven plus geschätzte zusätzliche Vorräte (Kategorie I – bekannte Vorräte) (engl. „Known conventional resources – KCR)	Menge: Reichweite:	2.523.000 t 37 Jahre	Menge: Reichweite:	4.588.000 t 67 Jahre
Ressourcen insgesamt, d. h. Reserven plus geschätzte zusätzliche Vorräte (Kat. I und II) plus spekulative Vorräte	(nicht genau bezifferbar)		Menge: Reichweite:	11.280.000 t 166 Jahre

**Tabelle 1: Übersicht über die weltweiten Vorräte an Uran, aufgefächert nach Grad der Sicherheit der Informationen über die Vorkommen (Zeilen) und nach der voraussichtlichen Kostenintensität des Abbaus (Spalten). Für jede Kategorie ist die vermutete Gesamtmenge an Uran sowie die sich daraus rechnerisch ergebende statische Reichweite angegeben. Die Berechnung der Reichweite geht dabei immer vom aktuellen jährlichen Verbrauch (68.000 Tonnen Uran) aus. Die Schwankungsbreite der Zahlenwerte zwischen 25 und 166 Jahren verdeutlicht, wie stark die Reichweite von den gewählten Voraussetzungen bezüglich Erkundungsstand und Preisobergrenze abhängt. (Quelle: NEA/IAEA 2004; identisch Framatome 2005; nahezu gleich BMWi/BMU 2006; teilweise etwas höher WBGU 2003).**

Dabei ist zu beachten, dass beide Größen, die in diese Rechnung eingehen, mit unvermeidlichen Unsicherheiten behaftet sind. Auf der einen Seite sind die Vorräte aus den oben genannten Gründen nicht mit letzter Sicherheit vorauszusagen. Außerdem hängt die – für die Unterscheidung zwischen wirtschaftlich ausbeutbaren und unwirtschaftlichen Vorräten Ausschlag gebende – Preisobergrenze in gewissem Maße von zukünftigen wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen ab. Auf der anderen Seite ist der gegenwärtige jährliche Gesamtverbrauch zwar relativ gut bekannt. Um den Zeitraum bis zur Erschöpfung der Vorräte zu prognostizieren, wären jedoch auch zukünftige Veränderungen des Jahresverbrauchs zu berücksichtigen, die schwer vorhergesagt werden können. Auf diesen Unterschied weist das Adjektiv „statisch“ ausdrücklich hin. Die so berechnete statische Reichweite stellt insofern nur eine (relativ leicht zu berechnen-

de) erste Annäherung an die tatsächliche („dynamische“) Reichweite der Uranvorräte dar.

### 3.4. Weitere Einflussfaktoren; genauere Abschätzungen der Reichweite

Eine genauere Abschätzung der tatsächlichen Reichweite müsste u. a. mögliche zukünftige **Veränderungen des Jahresverbrauchs** berücksichtigen. Beispielsweise könnte sich im Falle eines Ausbaus der Kernenergienutzung in mehreren Ländern der weltweite Jahresverbrauch erhöhen und damit die Reichweite verkürzen. Umgekehrt würden im Falle eines Rückgangs der Nutzung vor allem in Ländern, die die Kernenergie derzeit relativ stark zur Stromerzeugung einsetzen, die Uranvorräte zeitlich gestreckt und die Reichweite dadurch entsprechend verlängert.

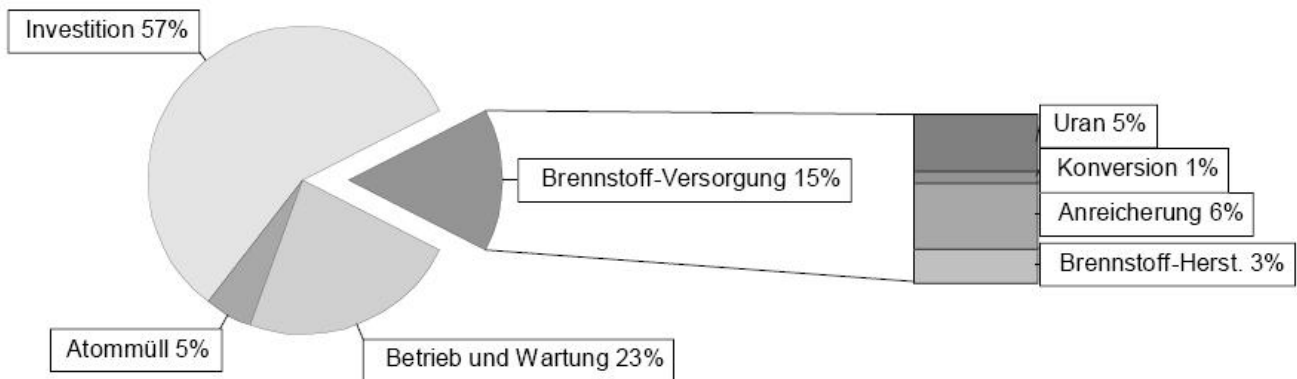
Neben politischen Entscheidungen könnten für solche Veränderungen auch **marktwirtschaftliche Mechanismen** eine Rolle spielen. Wie bei anderen Energieträgern auch und generell bei praktisch allen Rohstoffen ist es plausibel anzunehmen, dass im Zuge einer schrittweisen Erschöpfung der Vorräte der Preis auf den Rohstoffmärkten steigt. Auch wenn der Einsatz nicht gänzlich unrentabel wird, könnten die Abnehmer dadurch verstärkten Anreiz sehen, den Brennstoff Uran noch besser auszunutzen – sei es, indem die Kraftwerksbetreiber in fortgeschrittene Kraftwerkstechnologie investieren, die den Brennstoff (etwas) besser ausnutzt und mehr Strom pro Kilogramm Uran erzeugt, oder indem die Endverbraucher ihren Stromverbrauch reduzieren und so insgesamt weniger Strom erzeugt werden muss. Umgekehrt könnten Preissteigerungen die Bergwerksbetreiber dazu veranlassen, ihre Abbauanstrengungen zu intensivieren und entweder bekannte Vorkommen noch vollständiger abzubauen oder verstärkt in die Suche nach und die Erschließung von neuen Vorkommen zu investieren<sup>6</sup>. Beide Tendenzen könnten dazu führen, dass die tatsächliche Reichweite eher oberhalb als unterhalb der statischen Reichweite liegt.

---

6 In diesem Zusammenhang weisen vor allem Umweltverbände darauf hin, dass in der Vergangenheit zuerst die leicht abbaubaren Uranvorkommen ausgenutzt worden sind, bei denen Uran in relativ hoher Konzentration im Gestein enthalten ist. Steigt der Uranpreis, so würden Bergbauunternehmen, auch schwächer konzentrierte Vorkommen (so genannte Armerzlagerstätten) abzubauen. Bei Abbau, der chemischen Behandlung („Konversion“) und bei der Entsorgung des vermehrt anfallenden Abraums würden dann wesentlich größere Umweltbelastungen auftreten als bei der bisherigen Urangewinnung.

Einschränkend ist in diesem Zusammenhang hinzuzufügen, dass die Brennstoffkosten im Falle der Kernenergie nur einen geringen Teil der gesamten Stromerzeugungskosten

### Kostenstruktur von Strom aus Kernenergie



**Abbildung 3: Kostenstruktur der Kernenergienutzung. Quelle: Greenpeace 2006 (Fig. 25).**

ausmachen (siehe Abbildung 3). Im Vergleich zu anderen Energieträgern fällt hier ein höherer Anteil an Kosten für Bau und Betrieb von Kraftwerken, für Risikovorsorge und für die Entsorgung an. Es ist daher zu vermuten, dass höhere Uranpreise allein nur in einem sehr geringen Maße zu einer Reduzierung des Jahresverbrauchs führen würden.

**Technische Beiträge** zu einer verlängerten Reichweite der Uranvorräte sind vor allem aus zwei Richtungen denkbar. Zum einen könnte durch eine erhöhte Temperatur im Reaktor die Stromausbeute gesteigert werden. Wie in fossil befeuerten Kraftwerken funktioniert auch in einem Kernkraftwerk die Stromerzeugung in einem zweistufigen Prozess. Zunächst wird im „Verbrennungs“-Schritt (der beim Kernkraftwerk im Unterschied etwa zu Kohlekraftwerken keinen chemischen Verbrennungsprozess, sondern einen kernphysikalischen Spaltungsvorgang darstellt) Wärmeenergie erzeugt. Im zweiten Schritt wird danach mit Hilfe einer Turbine mit angeschlossenem Generator Strom erzeugt. Dabei kann allgemein die Wärmeenergie nicht vollständig in elektrische Energie umgesetzt werden. Vielmehr verbleibt immer ein erheblicher Rest an Abwärme. Sie wird entweder an die Umgebung abgegeben oder im Rahmen der Kraft-Wärme-Kopplung teilweise für Heizzwecke genutzt. Der für die Stromerzeugung nutzbare Energieanteil („Wirkungsgrad“) ist nun aufgrund physikalischer Gesetze in allen Kraftwerken umso größer, je höher die Betriebstemperatur im Kraftwerksinneren ist. Eine Temperaturerhöhung ist beispielsweise auch einer der Mechanismen, mit denen moderne Gaskraftwerke höhere Wirkungsgrade erzielen. Begrenzt wird diese Möglichkeit dadurch, dass die Kraftwerksbauteile (Rohre, Kessel, Schweißnähte u.a.) den hohen

Temperaturen dauerhaft standhalten müssen. Technische Lösungen sind daher teilweise sehr aufwändig und verursachen dementsprechend auch höhere Investitionskosten.

Im Rahmen der Kernenergienutzung könnten solche höheren Wirkungsgrade im so genannten **Hochtemperaturreaktor** erzielt werden. Dieses Konzept wurde in Deutschland am Standort Hamm-Uentrop verfolgt; seine Betreiber führten neben dem höheren Wirkungsgrad auch eine höhere Betriebssicherheit als Argument für diesen Reaktortyp an. Dennoch wurde der 1983 in Betrieb gegangene Reaktor aus Kosten- und Sicherheitsgründen bereits 1989 wieder stillgelegt und die Technologie seither in Deutschland – im Gegensatz zu einigen anderen Staaten – nicht weiter verfolgt.

Eine weitere, prinzipielle Alternative stellt der so genannte **Brutreaktor** dar. In ihm wird nicht nur durch Kernspaltung aus dem Uran-Isotop  $^{235}\text{U}$  Energie gewonnen. Vielmehr wird im Reaktor gleichzeitig das in der natürlichen Uranmischung reichlicher vorhandene Isotop  $^{238}\text{U}$  in Plutonium umgewandelt und so neues spaltbares Material zur Energiegewinnung erzeugt. Alternativ könnte in einem analogen Prozess aus dem in der Natur häufiger vorkommenden Metall Thorium wiederum spaltbares Uran (Isotop  $^{233}\text{U}$ ) erzeugt werden. Die so „erbrüteten“ spaltbaren Materialien könnten danach für die Energiegewinnung genutzt werden. Durch beide Varianten könnten die vorhandenen Uranvorräte erheblich gestreckt werden. Verfechter des Konzepts sprechen von einer 30- bis 100-fachen oder – mit Thorium – sogar noch deutlich höheren Verlängerung der Reichweite. Die technische Realisierung würde allerdings eine Verbundwirtschaft aus Brutreaktoren, Wiederaufarbeitungsanlagen und Leichtwasserreaktoren erforderlich machen, die weltweit bisher nicht realisiert ist und auch in Deutschland derzeit als politisch nicht durchsetzbar erscheint. Der Bau eines Schnellen Brütters am deutschen Standort Kalkar wurde zwar 1985 im Prinzip fertig gestellt, jedoch nicht in Betrieb genommen und das gesamte Projekt ab 1991 wieder aufgegeben.

Schließlich könnte auch bei den üblichen Reaktoren aus den „abgebrannten“ Brennelementen durch **Wiederaufarbeitung** der verbleibende Anteil von unverbrauchtem spaltbarem Material zurückgewonnen und für die Produktion neuer Brennelemente eingesetzt werden. Auf diese Weise könnte die Reichweite der bekannten Uranvorräte verlängert werden. Diese Technik gilt jedoch als umweltgefährdend. Von verschiedener Seite wird daneben auch auf das Risiko des militärischen Missbrauchs verwiesen. Seit dem Baustopp der geplanten Anlage im bayerischen Wackersdorf Ende der 1980er Jahre gibt es in Deutschland keine Aktivitäten zur Wiederaufarbeitung mehr.

Weitere technische Lösungen, die zu einer nennenswerten Erhöhung der Uran-Reichweite führen könnten, sind derzeit nicht in der Diskussion.

#### 4. Diskussion und Zusammenfassung

Die Zahlen in Tabelle 1 verdeutlichen, dass die Reichweite der Uranvorräte nach gegenwärtigem Stand (d. h. bei momentanem Jahresverbrauch, aktuellen Marktpreisen und gegenwärtigem Kenntnisstand über die Vorkommen) bei mindestens etwa 47 Jahren liegt, falls Preissteigerungen bis auf 130 US-Dollar pro Kilogramm Uran als wirtschaftlich vertretbar angesehen werden. Eine solche Zeitspanne von knapp 50 Jahren würde grob dem Lebenszyklus (Planung, Bau und Betrieb) einer einzelnen Generation von Kraftwerksneubauten entsprechen. Unter restriktiveren Voraussetzungen (Preise nicht über 40 \$/kg) ergibt sich eine kürzere Reichweite von nur 25 Jahren. Optimistischere Annahmen unter Einbeziehung auch der „spekulativen“ Ressourcen führen umgekehrt zu einer Erhöhung der statischen Reichweite auf über 160 Jahre.

Der Einfluss einiger Faktoren – wie zukünftige Preissteigerungen auf dem Uranmarkt, technologische Fortentwicklungen oder politische Entscheidungen – könnte dazu führen, dass die Reichweiten über die oben genannten Werte hinaus ansteigen. Andere Faktoren – wie eine Steigerung des Energieverbrauchs und/oder ein erhöhter Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung insbesondere in Ländern wie Indien oder China – könnten umgekehrt zu einer Verkürzung der Reichweiten führen. Diese Faktoren sind nur mit erheblichen Unsicherheiten prognostizierbar; daher können ihre möglichen Auswirkungen auf die Reichweiten derzeit nicht genauer quantifiziert werden. Alle berechneten Reichweiten sind daher immer nur als grobe Annäherung an die Zeitspanne bis zur tatsächlichen Erschöpfung der Vorräte zu verstehen.

Mit Sicherheit festzustellen ist jedoch, dass Uran insgesamt ein begrenzter Rohstoff ist, der der Menschheit im bisherigen Ausmaß nur für einige weitere Generationen – und damit nicht wesentlich länger als Öl oder Gas und eher kürzer als die Kohle – zur Verfügung stehen wird (BMWi/BMU 2006). Bemerkenswert an den unterschiedlichen Darstellungen in der Literatur zur Thematik der Uranvorräte ist, dass Verfechter und Kritiker der Kernenergie sich bei den reinen Zahlen zu Uranvorräten und Reichweiten relativ einig sind. Sie beziehen sich dabei meist auf dieselbe Quelle, das „Red Book“ der Nuclear Energy Agency der OECD (Framatome 2005; Greenpeace 2006)<sup>7</sup>.

Deutliche Unterschiede treten erst bei der politischen Bewertung dieser Zahlen auf. So weisen Vertreter der Energiewirtschaft darauf hin, dass der Uranbedarf sicher „für mehr als 80 Jahre“, wahrscheinlich „sogar für mehr als 130 Jahre“ und eventuell sogar für „mehrere hundert Jahre“ gedeckt werden könne. „Unter diesen Voraussetzungen hat die

---

7 Zwar werden vereinzelt auch deutlich abweichende Zahlen genannt, mit längeren Reichweiten von 200 Jahren (BMWi 2006) bzw. bis zu 400 Jahren (Heinloth 2003). Jedoch scheinen diese Prognosen auf weniger umfanglichem Zahlenmaterial zu basieren als das „Red Book“. Die Diskrepanz könnte teilweise auch dadurch zustande kommen, dass Ressourcen mit Abbaukosten oberhalb von 130 \$/kg einbezogen werden, deren Abbau aus heutiger Perspektive unwirtschaftlich erscheint.

Kernenergie das Potential eines nachhaltigen Energieträgers...“ (Max 2005). Es werde „beim Uran in der absehbaren Zukunft möglich sein, den laufenden Verbrauch durch Entdecken neuer Reserven mindestens auszugleichen“. „Die Uranreserven liegen überwiegend in politisch stabilen Regionen. Die Versorgungssicherheit ist hoch“. „Uran trägt zu einer nachhaltigen Energieversorgung bei“ (Framatome 2005).

Umweltverbände argumentieren entgegengesetzt: „Die heute bekannten Uranvorräte können einen steigenden Bedarf nicht decken“. Die Uranvorräte „scheinen ... etwa zwischen 2026 und 2070 erschöpft“. Wegen zu erwartender Preissteigerungen biete „Uran ... anders als die Energierohstoffe Wind und Sonne keine verlässliche Kalkulationsbasis“. „Versorgungssicherheit ist nicht dadurch zu erreichen, einen begrenzten Rohstoff durch einen anderen zu ersetzen“. „Atomkraft ist keine Lösung für die Energieprobleme dieser Welt. Sie blockiert Alternativkonzepte“ (Greenpeace 2006).

Die Frage, ob die Uranvorräte knapp oder nicht knapp und damit die Kernenergie auch langfristig „zukunftsfähig“ ist oder nicht, ist daher weiterhin strittig. Ob der Zeitraum von 50 bis 150 Jahren bis zur voraussichtlichen Erschöpfung der Vorräte als lang – z. B. im Vergleich zu politischen Vorgängen – oder kurz – z. B. im Vergleich zu historischen oder erdgeschichtlichen Prozessen – bewertet wird, erscheint damit letztlich auch als eine Frage des jeweiligen politischen Zeithorizonts.

## 5. Quellen und Literaturangaben

- BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2004). Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2004 – Kurzstudie. Im Internet: [http://www.bgr.bund.de/cln\\_029/nn\\_454936/DE/Themen/Energie/Produkte/energiestudie\\_2004\\_nichterneuerbar.html](http://www.bgr.bund.de/cln_029/nn_454936/DE/Themen/Energie/Produkte/energiestudie_2004_nichterneuerbar.html) [Stand 16.03.2006].
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2006). Uranvorräte reichen noch 200 Jahre. Pressemitteilung vom 09.02.2006. Im Internet: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Wirtschaft/Branchenfokus/bergbau-und-energie.did=118770.html> [Stand 07.03.2006].
- BMWi/BMU – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2006). Energieversorgung für Deutschland – Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006. Im Internet veröffentlicht am 16. März 2006: [http://www.bmu.de/files/download/application/pdf/statusbericht\\_0603.pdf](http://www.bmu.de/files/download/application/pdf/statusbericht_0603.pdf).
- DPG – Deutsche Physikalische Gesellschaft (2005). Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990-2020. Im Internet: [http://www.dpg-physik.de/info/broschueren/klimastudie\\_2005.pdf](http://www.dpg-physik.de/info/broschueren/klimastudie_2005.pdf) [Stand 13.03.2006].
- Framatome ANP GmbH (2005). Wie lange reicht das Uran? „argumente – Energie, Umwelt Gesellschaft“, November 2005. Im Internet: [http://www.framatome.de/anp/d/foa/anp/print/argumente/argumente\\_Uran\\_11\\_2005.pdf](http://www.framatome.de/anp/d/foa/anp/print/argumente/argumente_Uran_11_2005.pdf) [Stand 07.03.2006].
- Greenpeace Deutschland e.V. (2006). Reichweite der Uranvorräte der Welt. Im Internet: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/2006\\_01\\_Uranreport\\_Langfassung.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/2006_01_Uranreport_Langfassung.pdf). Kurzfassung unter: [http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/atomkraft/2006\\_02\\_Kurzfassung\\_Uranreport\\_tb02.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/2006_02_Kurzfassung_Uranreport_tb02.pdf) [Stand 07.03.2006].
- Heinloth, Klaus (2003). Die Energiefrage: Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten. Braunschweig: Vieweg.
- Max, Arthur (2005). Stand und Perspektiven des internationalen Uranmarktes. Informationskreises Kernenergie – Vortrag am 15.03.2005 im „Forum in Berlin“. Im Internet: [http://www.kernenergie.net/informationskreis/de/veranstaltungen/foruminberlin/veranstaltung\\_detail.php?navid=10&detail=/veranstaltungen/de/foruminberlin/2005\\_03\\_15\\_veranstaltung.php](http://www.kernenergie.net/informationskreis/de/veranstaltungen/foruminberlin/veranstaltung_detail.php?navid=10&detail=/veranstaltungen/de/foruminberlin/2005_03_15_veranstaltung.php) [Stand 20.03.2006].
- NEA/IAEA –Joint NEA/IAEA Uranium Group“ der Nuclear Energy Agency der OECD und der International Atomic Energy Agency (2004). Uranium 2003. Bekannt unter dem Namen “The Red Book”. Im Internet: <http://www.oecdbookshop.org/oecd/display.asp?sfl=identifiers&st1=662004081P1> [Stand 13.03.2006].
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2003). Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit – Jahresgutachten 2003. Bundestags-Drucksache Nr. 15/4155.