



Energiequelle Uran – Ressourcen, Gewinnung und Reichweiten im Blickwinkel der technologischen Entwicklung

Dr.-Ing. Michael Lersow, Obmann des Arbeitskreises „Tailings“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) e.V., Breitenbrunn, und Dr. rer. nat. habil. Horst Märten, Geschäftsführer der UIT GmbH Dresden und Managing Director Technology of Heathgate Resources Pty. Ltd. and Quasar Resources Pty. Ltd., Adelaide, Australien

Die Sicherung und Entwicklung der Energieerzeugung in der Zukunft wird sowohl von den verfügbaren Ressourcen als auch von technologischen, ökonomischen, ökologischen, (sicherheits-)politischen und sozialen Randbedingungen bestimmt. Die vorliegende Arbeit zielt nicht auf eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Formen der Energieerzeugung hinsichtlich des Einflusses auf den Klimawandel, der unmittelbaren und mittelbaren Belastungen der Umwelt, der (subventionsbereinigten) Energieerzeugungspreise oder sonstiger Bedingungen wie technologischer Fortschritt, Sicherheit, Abfallproblem – alles Fragen, die bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Energiestrategie zu berücksichtigen sind.

Für die Energiequelle Uran soll im Folgenden verdeutlicht werden, in welchem Umfang natürliche Ressourcen bekannt sind, welche Ergebnisse aus der weiteren Erkundung zu erwarten sind und unter welchen Randbedingungen die daraus resul-

tierende Reichweite (also ressourcenbedingte Lebensdauer der Kernenergiegewinnung überhaupt) zu quantifizieren und zu bewerten sind.

Eine (zu) simple Betrachtung beruht auf der Berechnung der Reichweite T [a] aus der Menge der abbaubaren Uranressourcen R [t U] und dem jährlichen Uranverbrauch V [t U/a] mithilfe der Formel [1]:

$$T = R/V \dots\dots\dots [1]$$

Im Folgenden sei diskutiert, wie sich die Höhe bekannter Ressourcen in ihrer Zeitabhängigkeit bisher entwickelt hat und von welcher Prognose bei einer Reichweitendiskussion ausgegangen werden sollte. Der Verbrauch ist eine integrale Größe und wird von der gesamten Elektroenergieproduktion aus Kernenergie einerseits sowie aus den relevanten Wirkungsgraden bei der Brennstoffgewinnung, dem Reaktorbetrieb, einschließlich des „Brütens“ neuen thermisch spaltbaren Materials in Reaktoren mit einer hohen Flussdichte an schnellen Neutronen, das heißt Umwandlung des in konventionellen thermischen Reaktoren faktisch nicht genutzten Uranisotops ^{238}U in thermisch spaltbares ^{239}U und weitere Transurane sowie der Transuranrezyklierung (das heißt der energetischen Umsetzung von Transuranen, die sich im Reaktorbetrieb bilden und den langlebigen Anteil des heutigen Reaktorabfalls ausmachen).

Berücksichtigt man diese Faktoren, also:

- Energieausbeute A [GWh/t U] pro Uranmenge (bezogen auf die eingesetzte Uranmenge) und deren Abhängigkeit von den Faktoren:
- Verwertungsfaktor $F1$ des Urans bei der Brennstoffherzeugung,
- Reaktorwirkungsgrad $F2$ (Abbrand an thermisch spaltbarem Uran) und
- Brut- und Rezyklierungsfaktor $F3$, in Relation zur gesamten Elektroenergieproduktion E [GWh/a] aus Kernenergie, so folgt daraus eine nach wie vor vereinfachte Beziehung gemäß der Formel [2]:

$$T = (R \cdot A)/E \dots\dots\dots [2]$$

wobei A eine Funktion der drei Faktoren $F1$, $F2$ und $F3$ ist, das heißt $A = f(F1, F2, F3)$.

Die dargestellten Zusammenhänge dienen im Folgenden der Diskussion zu gegenwärtigen Daten und Trends. Da es sich um eine Betrachtung handelt, die in der Zeitskala zumindest das laufende

Eine solide Bewertung der künftig verfügbaren Uranressourcen und damit zusammenhängender strategischer Reichweiten muss Trends in der Erkundung, den technologischen Entwicklungsgrad der verschiedenen Stufen des Kernbrennstoffkreislaufs (angefangen mit Bergbau und Aufbereitung), insbesondere aber auch die spezifische Rohstoff- und Energieausbeute künftiger Generationen der Brennstoff- und Reaktortechnologie berücksichtigen. Uranvorkommen auf der Erde werden hinsichtlich Erzgehalt und voraussichtlicher Produktionskosten kategorisiert. Die in der Folge des gestiegenen Uranpreises intensivierte Erkundung wird zur Entdeckung weiterer Vorräte führen und damit dem historischen Trend weiter folgen. Die Urangewinnung unterliegt heute zunehmend stringenteren gesetzlichen Rahmenbedingungen – Bergbau und Aufbereitung werden zunehmend nach strengen internationalen Standards zur Minimierung der Umweltauswirkungen während des Betriebs sowie zur Sanierung und Rekultivierung der Standorte nach Schließung genehmigt. Neue beziehungsweise erweiterte/modernisierte Standorte der Urangewinnung beruhen auf modernen, halb- oder vollautomatischen Technologien. Strahlenbelastung und Umweltauswirkungen werden minimiert durch eine Vermeidung von Tailings (wie bei der In-Situ-Laugung), durch die Verlagerung von Teilprozessen der Aufbereitung nach untertage beziehungsweise durch die Verwahrung der Rückstände aus konventionellen Anlagen nach internationalen Standards. Neben einer überschlägigen Prognose auf der Grundlage gegenwärtig verfügbarer Daten werden Trends der Ressourcenentwicklung, der Uranproduktion (in Relation zum Bedarf), der Brennstoffherstellung sowie der Energieausbeute aus Uran einschließlich der Option der energetischen Verwertung von Transuranen zur Minimierung der radioaktiven Abfälle diskutiert und auf die Reichweitenabschätzung qualitativ übertragen.

Jahrhundert berücksichtigt, sollen technologische Konzepte der Nukleartechnologie (zum Beispiel neuer möglicher Reaktorgenerationen) in die Betrachtung einfließen.

Uranpreisentwicklung

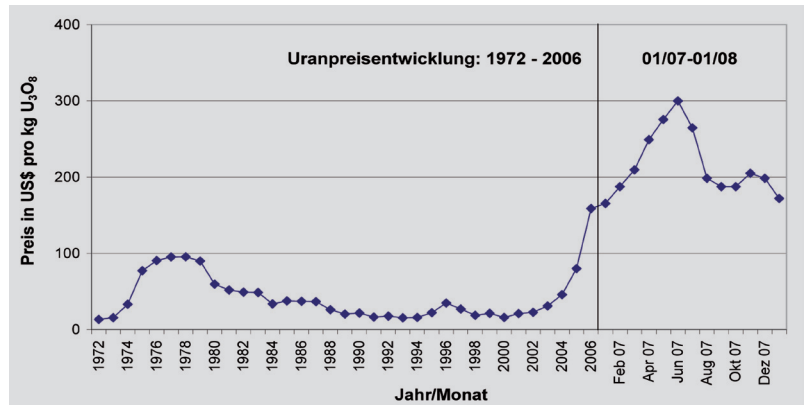
Zur Bewertung wirtschaftlicher Kriterien ist eine kurze Betrachtung der Entwicklung des Uranpreises auf dem Weltmarkt angebracht. Der Uranpreis bestimmt die Abbauwürdigkeit von verschiedenen Erzkatégorien beziehungsweise Standorten und war in der Vergangenheit immer mit den getätigten Aufwendungen für die Erkundung korreliert, was einen direkten Einfluss auf die Entdeckung neuer Ressourcen hat.

Nach dem Anstieg des Uranbedarfs durch den Bau zahlreicher Kernkraftwerke hielt sich der Uranpreis in den 1970er-Jahren auf einem relativ hohen Niveau, gefolgt von einem Rückgang durch die Rezession in der Nukleartechnologie, nicht zuletzt verursacht durch die Reaktorunfälle von Three Mile Island und Tschernobyl (Bild 1). Bis zum Jahr 1990 lag die Uranproduktion immer deutlich über dem Verbrauch in Kernkraftwerken. Ursache hierfür war die militärische Nutzung und das Anlegen strategischer Reserven. Dies änderte sich abrupt um das Jahr 1990 – seit etwa 1993 werden nur noch etwa 60 % des eigentlichen Uranverbrauchs produziert. Erst durch das Versiegen der sekundären Quellen für Uranbrennstoff und die weltweite Renaissance auf dem Kernenergiesektor stieg der Uranpreis seit dem Jahr 2004 erheblich an und erreichte im Jahr 2007 das historische Hoch von 303 US-\$/kg U_3O_8 (handelsübliche Bezugsgröße für den Uranpreis). Gegenwärtig schwankt der Uranpreis um 200 US-\$/kg U_3O_8 .

Uranvorkommen und -gewinnung

Uran ist ein gewöhnliches Metall und kommt auf der Erde so häufig vor wie etwa Zink. Die mittlere Konzentration in der Erdkruste liegt bei etwa 4 ppm, im Meerwasser finden sich etwa 3 ppb. Der gesamte Urangehalt der Erdkruste wird auf knapp $41 \cdot 10^{12}$ t geschätzt. Tiefengesteine, wie Granit beinhalten rund 4 ppm Uran, in Sedimentgesteinen ist der Gehalt im Mittel nur halb so hoch. Von Uranerz spricht man ab Gehalten von 0,03 % (300 ppm U), zum Beispiel in Kasachstan durch Anwendung der In-Situ-Laugung (ISL) ausgebeutet, in der Regel aber ab 0,1 % (1 000 ppm U). Hochgradiges Uranerz hat Urangehalte in der Größenordnung 2 % (20 000 ppm U) und darüber hinaus.

Die Gewinnung von Uran erfolgt in Abhängigkeit vom Lagerstättentyp. Prinzipiell unterscheidet man vulkanogene und Sedimentlagerstätten. In der Literatur werden 14 verschiedene Lagerstättentypen beschrieben (4). Konventioneller Erzabbau (Tiefbergbau oder Tagebau) mit weiterer Erzaufbereitung wird ergänzt durch die Methode der In-Situ-Laugung, die in permeablen Sedimentformationen ihre Anwendung findet (Bild 2). Typische Beispiele der ehemaligen Uranerzgewinnung in Deutschland sind der Erzabbau aus der hydrothermalen Ganglagerstätte Schlema/



Alberoda oder die spezifische ISL-Gewinnung aus der Sedimentlagerstätte Königstein. ISL wird heute hauptsächlich in Kasachstan, Australien und in den USA betrieben. Uran tritt häufig im Verbund mit anderen Metallen auf (zum Beispiel Gold, Kupfer, Vanadium) und wird als Nebenprodukt gewonnen, insbesondere in Fällen mit geringeren Urangehalten im Erz – wobei aber die Kombination der Produktion verschiedener Rohstoffe eine wirtschaftliche Verwertung des Urans zulässt. Dies geschieht zum Beispiel in Südafrika und in Australien. Bekanntestes Beispiel ist die ursprünglich als Kupferbergwerk aufgeschlossene Lagerstätte Olympic Dam in Australien (Bild 3).

Uranressourcen

Unter einer Ressource versteht man in der Regel die bekannte Menge eines Rohstoffs, die mit den Abbaumethoden nach dem Stand der Technik wirtschaftlich gewonnen werden kann. Hierbei gibt es zahlreiche Differenzierungen, die in verschiedenen Teilen der Welt unterschiedlich definiert sind. Bei den bekannten Mengen eines Rohstoffs unterscheidet man zwischen den nachgewiesenen (erkundeten und damit glaubwürdigen) sowie den prognostizierten sowie spekulativen. Bei den nachgewiesenen Ressourcen differenziert man zusätzlich nach hinreichend gesicherten (RAR – Reasonably Assured Resources) und abgeleiteten (Inferred Resources) Vorräten.

Bild 1. Uranpreisentwicklung seit Beginn der 1970er-Jahre, Zeitskala seit Januar 2007 gestreckt (UxConsulting, LLC).

Bild 2. Prinzip der In-Situ-Laugung (ISL) von Uran mit Lösungskreislauf und Aufbereitungsanlage.

Quelle: Heathgate Resources, Adelaide, South Australia.

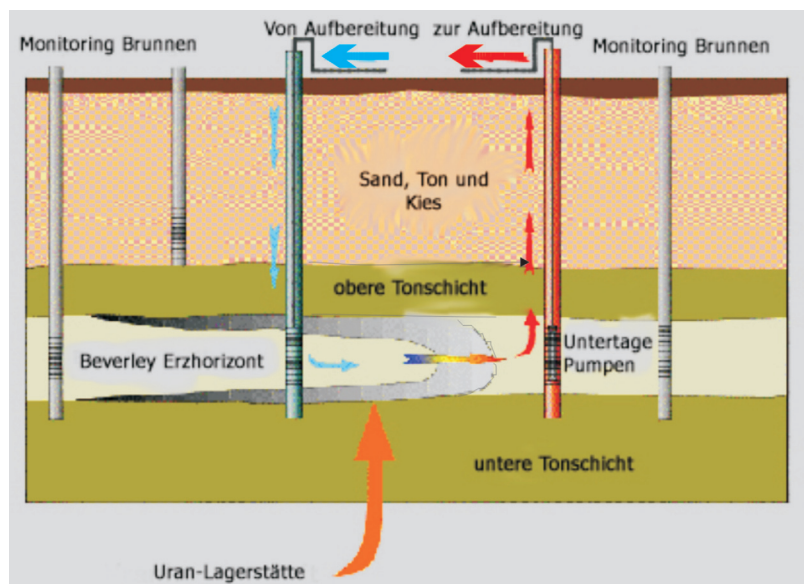




Bild 3. In-Situ-Laugung (ISL), Beverley-Lagerstätte; links: Brunnenfeld mit belassener Vegetation als Beispiel umweltgerechten Bergbaus, mitte: automatisierte Aufbereitungsanlage nach modernsten Sicherheitsstandards, rechts: Aufbereitungsanlage (vgl. Bild 4).

Quelle: Heathgate Resources, Adelaide, Australia

Ressourcen werden ebenfalls nach wahrscheinlichen spezifischen Abbaukosten differenziert. Die Wirtschaftlichkeit der Urangewinnung hängt letztlich in starkem Maß vom Weltmarktpreis ab. Im Unterschied zum Begriff Ressource ist im gängigen Verständnis eine Reserve diejenige Rohstoffmenge, die künftig tatsächlich mit vorhandenen und genehmigten Anlagen abbaubar ist.

Die zuverlässigste und vollständigste Quelle zu Daten über Uranressourcen ist der seit dem Jahr 1965 alle zwei Jahre erscheinende Bericht „Uranium: Resources, Production and Demand“, der gemeinsam von der Nuclear Energy Agency der OECD (OECD/NEA) und der International Atomic Energy Agency (IAEA) herausgegeben wird, das so genannte „Red Book“. Die Ausgabe aus dem Jahr 2005 enthält die in Tabelle 1 zusammengefassten Daten. Darin sind auch die in der Tabelle 1 zugeordneten Definitionen der verschiedenen Kategorien der Ressourcen dargelegt.

Die im Jahr 2005 bekannten nachgewiesenen Ressourcen beliefen sich auf 4,7 Mill. t U, während die wahrscheinlichen Vorräte per 2005 in der Größenordnung von 14,8 Mill. t U angegeben wurden. Im Jahr 1965 – dem Jahr der Ersterscheinung des „Red Book“ – lagen die bekannten wahrscheinlichen Vorräte noch bei 3,2 Mill. t U. Diese Entwicklung beruht auf der fortlaufenden Erkundung, wobei die weltweit aufgewandten Erkundungskosten deutlich mit dem Marktpreis des Urans korrelieren. Durch den Uranpreisanstieg seit dem Jahr 2004 sind die Erkundungsaufwendungen in der Welt wieder enorm gestiegen. Die aktuelle Zahl der nachgewiesenen Uranressourcen hat sich seit den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts verdoppelt. Australien berichtete im Jahr 2007 über eine Erhöhung der Landesressourcen um etwa 36 %, bedingt durch die Aktualisierung der

Daten für Olympic Dam und die Entdeckung der Weltklasse-Lagerstätte Four Mile bei Beverley, die erste Neuentdeckung in Australien seit Kintyre vor über 30 Jahren.

Zusätzlich zu den oben genannten Uranvorräten findet sich das Metall in Phosphatlagerstätten (mit 50 bis 200 ppm). Die frühere Urangewinnung aus Phosphatlagerstätten wurde aufgrund des Preis einbruchs zu Beginn der 1980er-Jahre aufgegeben. Die gesamten Uranvorräte in solchen Lagerstätten liegen in der Größenordnung von 9 Mill. t U mit dem Hauptanteil von knapp 7 Mill. t U in Marokko.

Die Tabelle 2 gibt die Aufteilung der nachgewiesenen Uranressourcen auf die Länder der Erde wieder.

Die Tabelle 3 veranschaulicht verschiedene Erzkatgorien (nach Urangehalt), den weltweiten Anteil an den bekannten Ressourcen und gibt typische Beispiele existierender Uranbergwerke an.

Urangewinnung versus Bedarf

Im September 2005 waren weltweit 442 Kernkraftwerke (KKW) mit einer Leistung von 368 GW installiert. Daraus wurde ein Jahresbedarf von etwa 68 000 t auf der Grundlage des heutigen Standes der Brennstoffherstellung und Energieausbeute hochgerechnet (siehe Uranium Markets, Informationsspeicher der World Nuclear Association (WNA), London). Nur etwa 60 % wird derzeit durch laufende Uranproduktion gedeckt (Tabelle 4). Der Rest kommt aus sekundären Quellen, Tendenz fallend, wie zum Beispiel von Uranvorräten (Stockpiles an Natururan und angereichertem Uran), aus der Weiteranreicherung von Urananreicherungsrückständen, der (begrenzten) Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoff (inklusive recycliertem Pu für Mischoxidbrennstoff) sowie dem Blending mit hochangereichertem Uran aus strategischen Vorräten. In der Tabelle 4 werden die wichtigsten Länder mit den Uranproduktionsdaten aufgeführt. Im Jahr 2006 wurden weltweit 41 % im Untertageabbau, 24 % im Tagebau, 26 % mittels ISL und die restlichen 9 % als Nebenprodukt (inklusive Olympic-Dam-Produktion) gewonnen.

Die Vorschau des Elektroenergieaufkommens auf der Grundlage von Kernenergie gemäß World Reference Scenario der WNA 2005 berücksichtigt drei Fälle:

- ➔ Nahezu gleichbleibende und tendenziell eher fallende Kernenergieproduktion.

Tabelle 1. Bekannte Uranvorräte, differenziert nach dem Grad der Glaubwürdigkeit und nach den spezifischen Produktionskosten („Red Book“, 2005).

	Kategorien der Uranvorräte	Uranvorräte in t U nach Produktionskosten			Unbelegte Vorräte
		< 40 US-\$/kg U	< 80 US-\$/kg U	< 130 US-\$/kg U	
Nachgewiesene Vorräte	Gesichert (RAR)	1 948 383	2 643 343	3 296 689	–
	Abgeleitet (Inferred)	798 997	1 161 038	1 446 164	–
Nachgewiesene Vorräte total				4 742 853	–
Unsichere Vorräte	Prognostiziert	–	1 700 100	2 518 800	
	Spekulativ	–	–	4 557 300	2 978 600
Unsichere Vorräte total				7 076 100	2 978 600
Summe				11 818 953	2 978 600

- ➔ Mäßiger Anstieg der Kernenergieproduktion um 43 % bis zum Jahr 2030.
- ➔ Ein hoher Anstieg der Kernenergieproduktion auf das Doppelte.

Die künftige Balance zwischen geplanten Außerbetriebnahmen von KKW der zweiten Generation und dem Neubau im Weltmaßstab ist bisher schwer zu beurteilen. Angesichts aktueller und geplanter KKW-Projekte ist mit einem moderaten Anstieg zu rechnen. Aufgrund des Rückgangs sekundärer Uranquellen für KKW und des damit verbundenen Uranpreisanstiegs wird die Schere zwischen Uranproduktion und Bedarf in den kommenden Jahren wachsen und somit die Urangewinnung mit Sicherheit steigen.

Interessant ist weiterhin ein Blick auf die Urankonzentrationen in den Lagerstätten, die gegenwärtig abgebaut werden. Über 60 % der nachgewiesenen Vorräte befinden sich in Lagerstätten mit mäßigen (0,1 bis 0,2 %) beziehungsweise niedrigen (< 0,1 %) Urangehalten. Diese werden zunehmend abgebaut, insbesondere mittels ISL in Sedimentlagerstätten. Eine weitere Komponente ist die Gewinnung von Uran als Nebenprodukt wie in Olympic Dam. Aus dieser größten Kupfer-Uran-Lagerstätte der Welt wird neben Kupfer, Gold und Silber auch Uran mit einem Gehalt von etwa 0,05 % gewonnen. Es ist geplant, im Rahmen des Olympic Dam Expansion Projects die Uranproduktion mindestens zu verdreifachen.

Der gestiegene Uranpreis machte auch die Urangewinnung aus dem Tagebau von Rössing in Namibia mit einem Urangehalt von nur 0,04 % wieder wirtschaftlich. Diese Beispiele belegen einen Trend. Bei relativ hohem Uranpreis wird der Abbau in Lagerstätten mit niedrigerem Urangehalt zunehmend wirtschaftlich.

In den letzten Jahren dominierte die Urangewinnung an Standorten mit relativ niedrigen spezifischen Kosten (Beispiel McClean Lake, Kanada, mit einem Produktionspreis von 5,64 Can-\$/lb U_3O_8 oder etwa 13 US-\$/kg U_3O_8 oder mehrere ISL-Bergwerke mit Kosten im Bereich von 30 US-\$/kg U_3O_8 , Tendenz steigend, 1 lb = 0,4536 kg).

Zahlreiche Bergwerke mit höheren Kosten mussten in den letzten 20 Jahren schließen. Da unterstellt werden kann, dass ein Uranpreisverfall in absehbarer Zeit nicht wahrscheinlich ist, werden Standorte mit höheren Produktionskosten wieder reaktiviert beziehungsweise neu aufgeschlossen. Hierin ist auch berücksichtigt, dass die Kosten für die Verwahrung am Ende der Lebensdauer eines Urangewinnungs- und Aufbereitungsstandorts bereits in den Projektkosten berücksichtigt wer-

Tabelle 2. Nachgewiesene Uranvorräte nach Ländern („Red Book“, 2005).

Rang	Land	Nachgewiesene Uranvorräte in t (< 130 US-\$/kg U)	Anteil in %
1	Australien	1 143 000	24,1
2	Kasachstan	816 099	17,2
3	Kanada	443 800	9,4
4	USA	342 000	7,2
5	Südafrika	340 596	7,2
6	Namibia	282 359	6,0
7	Brasilien	278 700	5,9
8	Niger	225 459	4,8
9	Russland	172 402	3,6
10	Usbekistan	115 526	2,4
	Sonstige	582 912	12,2
Gesamtvorratsmenge		4 742 853	100

den (2). Die Verwahrungsplanungen sind mittlerweile integraler Bestandteil jedes Bergbauprojekts und es wird garantiert werden müssen, dass über Rückstellungskontrollen (Rechnungshof) oder durch unwiderrufliche Bankgarantien die notwendigen finanziellen Mittel für die Verwahrung zukünftig auch bereit stehen (6). Alles dies wird der Uranmarkt bei seiner Preisnotierung zu berücksichtigen haben.

Da der Uranbrennstoff aber nur zu etwa 20 % (Natururan als Rohstoff nur zu etwa 5 %) die Energiekosten bei Kernenergie bestimmt (im Unterschied zu etwa 80 % in herkömmlichen Kraftwerken auf Grundlage fossiler Brennstoffe) wäre eine nachhaltige Energiepolitik auf der Grundlage der Kernenergie auch bei Tolerierung höherer Produktionskosten für Uran nicht ausgeschlossen.

Die Technologien der Urangewinnung wurden in den letzten Jahren im Zusammenhang mit der Implementierung erheblich verbesserter Sicherheitsstandards für Mensch und Umwelt weiterentwickelt.

Abgesehen von Lagerstätten mit hoher Urankonzentration, geht mit der Gewinnung von Uran aus Lagerstätten mit niedrigen und mäßigen Urankonzentrationen eine Vergrößerung der Landinanspruchnahme pro kg produzierten Urans einher. Dass die Verwahrungskosten für Neuaufschlüsse dennoch in den letzten Jahren konstant weltweit kleiner als 10 US-\$/kg geblieben sind, liegt daran, dass sich einerseits die Abbautechnologien wesentlich verbessert haben, andererseits die Gewinnungs- und Aufbereitungs-

Tabelle 3. Kategorien der Lagerstätten, Häufigkeit und Beispiele (UT – Untertageabbau, TB – Tagebau, ISL – In-Situ-Laugung), etwa 11% der Uranvorräte mit unbekannter Urankonzentration.

Lagerstättenkategorie	sehr hoch	hoch	mittel	gering	sehr gering
Urangehalt in %	> 10	1 – 10	0,2 – 1	0,1 – 0,2	< 0,1
Anteil der Uranvorräte	12 %	2 %	13 %	31 %	31 %
Beispiele (Lagerstätte, Erzgehalt, Standort, Betreiber)	McArthur River, 25 %, Saskatchewan, Kanada, UT, Cameco	McClean Lake, 2,4 %, Saskatchewan, Kanada, TB und UT, Cogema	Ranger, 0,24 %, Australien, TB, ERA Dolni Rozinka, 0,3 %, CR, TB, DIAMO	Berberley, 0,18 %, Australien, ISL, Heathgate Resources	Khan Rivier, 0,04 %, Namibia, TB, Rössing Mehrere Lagerstätten ca. 0,05 %, Kasachstan, ISL (Verschiedene Betreiber)

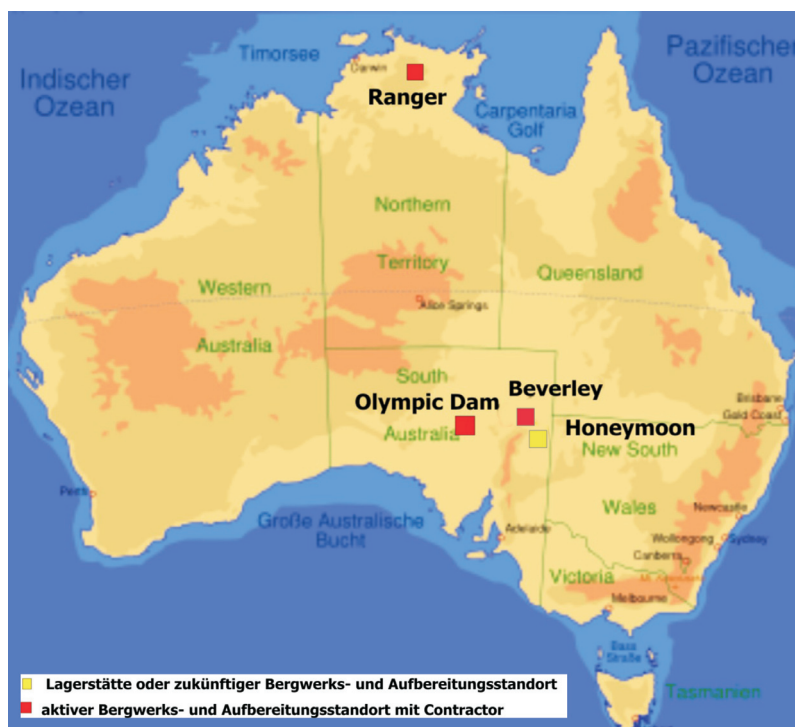
Tabelle 4. Uranproduktion im Jahr 2006 (WNA Market Report).

Rang	Land	Uranproduktion in t U (2006)	Anteil in %
1	Kanada	9 862	24,9
2	Australien	7 593	19,1
3	Kasachstan	5 281	13,3
4	Niger	3 443	8,7
5	Russland	3 190	8,6
6	Namibia	3 067	7,8
7	Usbekistan	2 260	5,7
8	USA	1 805	4,3
	Sonstige	3 102	7,6
Gesamtvorratsmenge		39 603	100

technologien so aufeinander abgestimmt sind, dass die Bergemassen und Aufbereitungsrückstände weitestgehend in den Abbaufeldern verbleiben. Bei einigen Altstandortverwahrungprojekten sind die spezifischen Verwahrungskosten erheblich höher und müssen zudem oftmals vollständig aus Steuermitteln aufgebracht werden (2). Der Kontakt des bergmännischen Personals mit den Abbaukontaminationen und damit die Strahlenbelastung wurden in Neuanlagen deutlich reduziert beziehungsweise vermieden; moderne Bergwerksanlagen sind weitestgehend automatisiert bis vollautomatisiert. In den HSEC (Health, Safety, Environment and Care)-Guidelines sind weitreichende Restriktionen enthalten, die scharf kontrolliert werden und deren Nichteinhaltung drastische Strafen nach sich ziehen.

Ein Beispiel für eine neue Politik im Bereich der Urangewinnung ist Australien. Das Land hat sich geöffnet, was den Export in solche Länder wie die Volksrepublik China und Russland betrifft. Pläne zur Schließung des Bergwerks Ranger wurden

Bild 4. Bergwerks- und Aufbereitungsstandorte in Australien (10).



zurückgestellt. Die bisher in Australien postulierte Drei-Lagerstätten-Strategie (Three Mines Policy) wurde mit Genehmigung des Uranabbaus in Honeymoon (Uranium One) aufgegeben. Das Bergwerk Olympic Dam wird in den nächsten Jahren expandieren (Bild 4). Die Bilder 2 und 3 (vgl. dort) demonstrieren Bergbau nach neuesten Umwelt- und Sicherheitsstandards am Beispiel Beverley (11).

Technologische Trends zum Brennstoffkreislauf und zur Uranverwertung

Brennstoff für KKW wird aus dem handelsüblichen Uranprodukt Yellow Cake (getrocknetes Triuran-octoxid) nach Konversion zu UF_6 , Anreicherung des thermisch spaltbaren ^{235}U von 0,7 % im Natururan auf etwa 3,3 bis zu mehr als 4 % und eigentlicher Brennelementherstellung gewonnen.

Neben der Einführung effektiverer Konversionstechnologien wird bei der Anreicherung eine zunehmend geringere Restkonzentration (früher 0,4 %, Trend heute zu 0,2 % und weniger) erreicht. Damit steigt der in der Formel [2] implizit eingeführte Uranverwertungsfaktor F1 bei der Brennstoffherstellung.

In herkömmlichen KKW wird ein höherer Reaktorwirkungsgrad F2 („Abbrandrate“) dadurch erreicht, dass zahlreiche Betreiber den Anreicherungsgrad im Brennstoff erhöhen und intensiver auf ^{235}U -Anteile unter 0,5 % abbrennen.

Aus den gegenwärtigen Daten zum Uranbedarf (68 000 t U/a) und der Elektroenergieproduktion aus KKW (368 GW beziehungsweise $3,2 \times 10^6$ GWh/a) ergibt sich eine Elektroenergieausbeute in Höhe von etwa 47 GWh/t eingesetztes Natururan (0,7 % ^{235}U). Nach dem Stand der Technik können heute aus einer t Natururan etwa 0,125 t angereichertes Uran für Brennstoff bei einer angenommenen Anreicherung von 4 % ^{235}U erzeugt werden (WNA). Andererseits hat sich der spezifische Abbrand in KKW auf Grundlage von Druck- oder Siedewasserreaktoren in den letzten 30 Jahren verdoppelt auf circa 40 GWd pro t angereichertem Uran im Brennstoff (13). Aus diesen aktuellen Kennzahlen folgt eine Energieausbeute A von 125 GWh/t Natururan, woraus sich im Vergleich zur oben angegebenen herkömmlichen Energieausbeute ein klarer Trend ablesen lässt, der durch den gegenwärtigen und künftigen Neubau von Kernreaktoren der dritten Generation verstärkt wird.

Will man Uranbedarfzahlen und Reichweiten langfristig beurteilen, so hat man Entwicklungstendenzen in der Reaktortechnologie zu berücksichtigen. Es wurden mehrere Konzepte für Reaktoren der vierten Generation, die physikalisch inhärent sicher sind und eine deutlich höhere Abbrandrate erwarten lassen, entwickelt. Mit der industriemäßigen Einführung derartiger Reaktoren wird nach dem Jahr 2030 gerechnet.

Einige der Reaktorkonzepte beruhen auf dem Betrieb mit schnellen Neutronen, das heißt das thermisch nicht spaltbare ^{238}U wird zum thermisch spaltbaren ^{239}Pu verwandelt (das so genannte „Brüten“). Während sich das Konzept des Brutreaktors im vergangenen Jahrhundert ökonomisch

nicht durchgesetzt hat, könnte es in Reaktoren der vierten Generation praktisch umgesetzt werden. Durch die Wiederaufbereitung abgebrannter Brennstäbe werden im Wesentlichen zwei Effekte erreicht: erstens die Rezyklierung von nicht abgebranntem Uran und zweitens die Verwertung erbrüteten Brennstoffs.

Neueste Studien gehen von der Annahme aus, dass sämtliche Transuranelemente, die im Reaktor entstehen (und heute den Hauptanteil des Nuklearabfalls ausmachen) rezykliert und damit energetisch verwertet werden könnten. Eine mögliche Form einer solchen Nutzung ist in Kugelhaufenreaktoren und deren Nachfolgern – heliumgekühlten Hochtemperaturreaktoren – gegeben (Einschluss des Brennstoffs in mechanisch und thermisch resistenten Kugeln). Dadurch könnte eine dreis- bis vierfach höhere Energieausbeute pro t U bei einer Absenkung des Nuklearabfalls auf etwa ein Zehntel erreicht werden. Durch wirksameres Brüten in neuen Reaktoren mit Feldern schneller Neutronen wäre eine weitere Vervielfachung der Energieausbeute möglich (3).

Reichweitenbewertung zur Energiequelle Uran

Schätzt man die Reichweite der Energiequelle stark vereinfacht gemäß der Formel [1] ab, so ergeben sich für die heute nachgewiesenen Uranressourcen in Höhe von etwa 4,7 Mill. t U (Tabelle 1) und dem hochgerechneten Jahresbedarf in den nächsten Jahren in Höhe von 68 000 t/a eine Reichweite von rund 70 a.

Vertraut man der Richtigkeit der gesamten gegenwärtig bekannten Ressourcen (einschließlich der prognostizierten und spekulativen, aber ausschließlich der unsicheren) in Höhe von insgesamt 11,8 Mill. t U (Tabelle 1) bei unverändertem hochgerechneten Jahresbedarf in Höhe von 68 000 t U, erhält man eine Reichweite von etwa 175 a. Der tatsächliche Jahresbedarf liegt bei 64 615 t U (Australian Uranium Association, Januar 2008).

Es wurde bereits darauf verwiesen, dass sich die Höhe der bekannten Uranressourcen in den letzten 20 Jahren etwa verdoppelt hat (der etwa gleiche Verdopplungseffekt wurde in den 1980er-Jahren relativ zu den 1960er-Jahren beobachtet, siehe „Red-Book“-Geschichte). Durch die jüngst intensiverte Erkundung kann durchaus mit einer Fortsetzung dieses Trends gerechnet werden.

Letztlich sei hinsichtlich des Produktionsaufkommens auf die ökonomische Seite der Urangewinnung hingewiesen. Mit einer Verknappung der Vorräte an fossilen Brennstoffen in den nächsten Jahrzehnten, die nach wie vor den Hauptanteil der Energieversorgung in der Welt decken, ist eine Erhöhung der Energiepreise unausweichlich. Da der Uranpreis an den Erzeugungskosten für Kernenergie nur einen sehr geringen Anteil ausmacht, wird der Abbau von Uran mit höheren spezifischen Produktionskosten zunehmend wirtschaftlich, das heißt der Anteil an abbauwürdigen Uranvorräten steigt anteilig. Es ist weder vernünftig noch notwendig, dass der Uranpreis wieder fällt, sollen alle mit der Gewinnung, Aufbereitung und der Verwahrung verbundenen Risiken abgedeckt werden.

Bei Berücksichtigung des Urans in Phosphatlagerrstätten erhöht sich die Reichweite auf mehr als 300 a. Zieht man die Produktion von Uran aus Meerwasser in Betracht – eine Alternative, die bei Verknappung der Energieressourcen weltweit darstellbar wäre –, so erhöht sich die Reichweite theoretisch um mehr als zwei Größenordnungen.

Wie bereits dargestellt, erhöht sich die Energieausbeute pro t U durch eine höhere Uranverwertung bei der Brennstoffherstellung (F1) sowie höhere Reaktorwirkungsgrade (F2) signifikant. Im Falle einer gleichbleibenden Kernenergieerzeugung könnte dies zu einem Rückgang des Uranbedarfs im Bereich von einigen zig Prozent führen, die bei steigender Energieerzeugung aus Kernenergie den Zuwachs weitgehend kompensieren würden. Mit den angeführten neuen technologischen Möglichkeiten der Nukleartechnologie (Reaktoren der vierten Generation sowie der Ausnutzung von Brennstoffbrüten und energetischer Abfallverwertung – Faktor F3), deren Einführung allerdings sehr unbestimmt ist, aber im Verlauf der nächsten 50 Jahre erfolgen könnte, wäre der spezifische Uranverbrauch künftig deutlich kleiner und dies würde – natürlich in Abhängigkeit vom tatsächlichen Umfang der künftigen Kernenergiegewinnung – zu einer weiteren Erhöhung der Reichweite für den Rohstoff Uran führen.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag verdeutlicht, dass eine ganzheitliche Betrachtung zur Verfügbarkeit der Energiequelle Uran neben den (bei weitem nicht vollständig bekannten) Ressourcen die verschiedenen Faktoren der Energieausbeute in Kernreaktoren unter einer Berücksichtigung künftiger technologischer Möglichkeiten berücksichtigen sollte. Eine statische Sichtweise auf der Grundlage heute gesicherter Ressourcendaten und des heutigen Uranverbrauchs (in KKW mit Reaktoren der zweiten Generation) führt zu einer gegebenenfalls erheblichen Unterbewertung der Reichweite. Die weitere Erkundung von Ressourcen, der Fortschritt in der Nukleartechnologie sowie die Berücksichtigung ökonomischer Kriterien, die auch den Uranabbau aus Lagerstätten mit geringer Konzentration und/oder schwierigen Abbaubedingungen rechtfertigen könnten (bis hin zur Gewinnung aus Meerwasser), korrigiert eine vereinfachte Reichweitenabschätzung zum Beispiel durch Diehl (12), deutlich nach oben.

Die folgenden Kommentare fassen aktuelle Tendenzen und Problemstellungen zusammen:

- ➔ Der Anteil der Kernenergie an der Weltelektroenergieproduktion beträgt derzeit etwa 16 % (World Nuclear Association, 2008). Prognosen zum absoluten Ausbau der Kernenergiegewinnung schwanken zwischen gleichbleibend bis Verdopplung bis zum Jahr 2030.
- ➔ Im Jahr 2005 produzierten 442 Kernreaktoren in 31 Ländern weltweit 368 GW_e. Der gegenwärtige jährliche Uranbedarf liegt bei etwa 68 000 t U. Länder wie die USA, Finnland und Frankreich haben sich dafür entschieden, auslaufende Kernkraftwerke durch neue zu ersetzen, Großbritannien und die Schweiz erwägen Neubauten. Dies werden alle Reaktoren

- der dritten Generation sein. Andere Länder wie Deutschland betreiben den planmäßigen Ausstieg aus der Kernenergie. Parallel zur Außerbetriebnahme von Kernkraftwerken in den nächsten Jahren sind derzeit 34 Reaktoren im Bau (28 MW_e) und 93 sind geplant (101 MW_e); (Australian Uranium Association, Stand: Januar 2008). Weitere Projekte sind in Vorbereitung.
- Insbesondere durch die Schwellenländer Volksrepublik China, Indien und Brasilien mit fast 2,7 Mrd. Menschen, dies sind derzeit 41 % der Weltbevölkerung, ist der Elektroenergiebedarf erheblich gestiegen. Diese Länder haben sich auch für den Ausbau der Kernenergie entschieden, ohne dass sie selbst über ausreichende Uranerzvorkommen verfügen.
 - Die Abhängigkeit der Rohstoffversorgung Europas, insbesondere von fossilen Energieträgern, sowie deren Reichweite auf der Grundlage wirtschaftlich gewinnbarer Vorräte hat dazu geführt, dass in einigen europäischen Ländern die Uranerzgewinnung zur Sicherung des nationalen Brennstoffbedarfs entweder fortgesetzt (Tschechien) oder ernsthaft in Betracht (zum Beispiel Bulgarien) gezogen wird.
 - Die Erkundung nach Uranvorkommen hat nach dem Uranpreisanstieg vor etwa drei Jahren weltweit erheblich zugenommen. Es ist künftig mit einem weiteren Anstieg der bekannten Uranressourcen zu rechnen.
 - Der Fortschritt in der Nukleartechnologie hat zu einer deutlichen Erhöhung der spezifischen Energieausbeute aus Uran geführt, was bei einer Reichweitenbetrachtung zu berücksichtigen ist. Durch die im Bau befindlichen oder geplanten Reaktoren der dritten Generation wird dieser Trend fortgesetzt und könnte durch die Implementierung von Reaktoren der vierten Generation in fernerer Zukunft eine neue Dimension erlangen.
 - In öffentlichen Diskussionen und in der Fachwelt wird die Frage nach der Akzeptanz der Kernenergie überhaupt sowie nach der Reichweite von Uranerzvorkommen verbunden mit weiterführenden Problemstellungen wie:
 - Umwelt- und Strahlenrisiken in Uranbergbau und -aufbereitung,
 - Verwahrung der Hinterlassenschaften der Uranerzgewinnung und -aufbereitung im Zusammenhang mit der genehmigungsseitigen und ökonomischen Absicherung (Rückstellungen/unwiderrufliche Bankbürgschaften) (6),
 - Weltweite Kontrolle über Uran und Kernbrennstoff (9),
 - Sicherheit von Kernkraftwerken und
 - Lagerung und Umgang mit Nuklearabfall aus KKW gestellt.
 - Der Anstieg des Uranpreises hat praktisch keinen oder nur einen marginalen Einfluss auf die Energiepreisentwicklung. Der Anteil der Urankosten an den Gesamtkosten für die Stromerzeugung aus Kernenergie beträgt weniger als 5 %. Ein angemessener Uranpreis ist notwendig, um die Urangewinnung und -aufbereitung entsprechend höchster internationaler Sicherheitsstandards zu betreiben und die Kosten für die Verwahrung nach Ende der Lebensdauer der Standorte abzudecken.

- Der primär durch fossile Energieträger verursachte Klimawandel hat die Zukunft der Kernenergie als Langzeitalternative für eine nachhaltige Energiegewinnung im Zusammenhang mit dem wirtschaftlichen Ausbau erneuerbarer Energien forciert. Für die Energieverteilung spielen Ländergrenzen keine Rolle, sodass eine nachhaltige Energiepolitik nur in großen Wirtschaftsräumen (global) durchgesetzt werden kann.

Die gesellschaftliche Aufgabe der Energieerzeugung unter Berücksichtigung technologischer, ökonomischer, ökologischer und sicherheitsrelevanter Randbedingungen wird in den einzelnen Ländern nicht zuletzt politisch entschieden. Hier gibt es allein in Europa große Unterschiede. Während Länder wie Finnland und Frankreich auf den Ersatz auslaufender KKW durch den Bau neuer Reaktoren der dritten Generation setzen, hat Deutschland den Ausstieg aus der Kernenergie proklamiert. Obwohl in Europa die Grenzen zwischen den Ländern zunehmend verschwinden, ist eine Vereinheitlichung der Energieversorgung derzeit nicht erkennbar. Konsequenzen nationaler Energiepolitik, insbesondere der Einfluss auf den Klimawandel, sind aber in hohem Maß global.

Elektroenergie ist ihrer Natur nach quellenneutral. Die einzelnen Länder bestimmen die effiziente, nachhaltige, auf die gesellschaftlichen Bedürfnisse und die Umwelt abgestimmte Energie- und Rohstoffwirtschaft auf ihre Weise. Für strategische Entscheidungen zur Art der Energieversorgung sind ökonomische Kriterien ebenso wichtig wie Umwelt- und Sicherheitsfragen, der technologische Fortschritt (inklusive Investitionen in relevante Forschung und Entwicklung) und nicht zuletzt die Nachhaltigkeit der Rohstoffversorgung für die Energieerzeugung. Prognosen zur Reichweite von Energieträgern spielen dabei eine wesentliche Rolle.

Quellennachweis

1. WISE Uranium Project, World Information Centre on Energy, www.wise-uranium.org
2. Lersow, M. ; Schmidt, P.: The Wismut Remediation Project, Mine Closure 2006. Perth, Western Australia, Proceedings, S. 181-190.
3. Märten, H.: Uranressourcen und Nuklearabfall im Blickwinkel der Kernenergiegewinnung der Zukunft. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozialität Berlin, Dresden. 28. September 2006, Band 89 (2005), S 75-89.
4. Supply of Uranium. Informationspapier der World Nuclear Association (WNA), London, September 2005. www.world-nuclear.org
5. Ux Consulting, LLC. www.uxc.com
6. Waggitt, P.: Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaus und deren Sanierung – Ein Überblick von Afrika, Asien und Australien. Glückauf 144 (2008) Nr. 3, S. 108-115.
7. Uranium 2005 – Uranium: Resources, Production and Demand. OECD-NEA & IAEA. Paris/Wien, 2006.
8. World Uranium Mining. Informationspapier der WNA. London, Juli 2005. www.world-nuclear.org
9. Nassauer, O.: Siamesische Zwillinge Kernenergie und Kernwaffen. Osteuropa 56 (2006) Nr. 4.
10. Information Centre, Australian Uranium Association, www.aua.org.au
11. Märten, H. ; Phillips, R. ; Woods, P.: Environmental Management of the Beverley Uranium Mine. UMREG 2007, IAEA-TECDOC
12. Diehl, P.: Reichweite der Uran-Vorräte der Welt. Für Greenpeace Deutschland, 2006
13. Current Trends in Nuclear Fuel for Power Reactors, IAEA, Nuclear Technology, Supplement, Review 2007