



BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Reinhard Grünwald
Claudio Caviezel
Hartwig E. Frimmel
Nikolaus Arnold
Matthias Englert
Moritz Kütt
Wolfgang Liebert

Verfügbarkeit von Uran

92

238,03

U

Uran



Reinhard Grünwald
Claudio Caviezel
Hartwig E. Frimmel
Nikolaus Arnold
Matthias Englert
Moritz Kütt
Wolfgang Liebert

Verfügbarkeit von Uran



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de

2016

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse seit 1990 in Fragen des technischen und gesellschaftlichen Wandels. Das TAB ist eine organisatorische Einheit des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Inhalt

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	19
2 Hintergrund	23
2.1 Geologie	23
2.1.1 Uran in IOCG-Lagerstätten	24
2.1.2 Diskordanzgebundene Uranlagerstätten	24
2.1.3 An Sandstein gebundene (Rollfront-)Uranlagerstätten	25
2.2 Abbaumethoden	26
2.2.1 Konventioneller Tagebau	27
2.2.2 Untertagebau	27
2.2.3 In-situ-Leaching	28
2.2.4 Uran als Nebenprodukt	29
2.2.5 Mikrobenunterstützte Urangewinnung	29
2.3 Unkonventionelle Ressourcen	30
2.3.1 Uran aus Phosphatlagerstätten	30
2.3.2 Uran aus Schiefer	32
2.3.3 Uranhaltige Kohle und Lignit	32
2.3.4 Uran aus Meerwasser	33
2.4 Historische Entwicklung und aktueller Status der Uranversorgung	34
3 Reserven und Ressourcen	39
3.1 Primäre Ressourcen	39
3.1.1 Definitionen	39
3.1.2 Ressourcenüberblick	42
3.1.3 Wesentliche Länder des Uranmarktes	50
3.1.4 Exemplarische Minenprojekte	65
3.1.5 Limitierungen und Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Minenprojekten	73
3.1.6 Exploration	77
3.1.7 Zukünftige Projekte	82
3.2 Sekundäre Ressourcen	88
3.2.1 Zivile und militärische Bestände	89
3.2.2 Wiederanreicherung abgereicherter Bestände	91
3.2.3 Uran aus der Wiederaufarbeitung und Ersparnis durch MOX-Nutzung	93



Inhalt

3.2.4	Uran aus Tailings	94
3.2.5	Überblick zur zukünftigen Verfügbarkeit sekundärer Ressourcen	95
<hr/>		
4	Ausblick und Zukunft	97
4.1	Theoretische und langfristige Verfügbarkeit	98
4.2	Kurz- und mittelfristige Uranverfügbarkeit (bis 2030/2035)	101
4.3	Andere Szenarien und Einschätzungen	108
<hr/>		
5	Literatur	117
5.1	In Auftrag gegebene Gutachten	117
5.2	Weitere Literatur	117
<hr/>		
6	Anhang	125
6.1	Abbildungsverzeichnis	125
6.2	Tabellenverzeichnis	126
6.3	Abkürzungen	126
6.4	Glossar	127



Zusammenfassung

Vorbemerkung

Das vorliegende Diskussionspapier hat seinen Ausgangspunkt in der Beauftragung des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) durch den Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages, einen Innovationsreport zum Thema »Rohstoffe für Hochtechnologien« zu erstellen. Diese Beauftragung erfolgte bereits 2010 und führte 2012 zur Vorlage des TAB-Arbeitsberichts Nr. 150 »Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien – Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie«. Im Laufe des Projekts reifte die Erkenntnis, das Thema Uran in einem gesonderten Bericht abzuhandeln. Hierfür waren zwei Gründe ausschlaggebend: Erstens unterscheiden sich die strukturellen ökonomischen und rohstoffpolitischen Bedingungen bei den dort vertieft behandelten Rohstoffen (vor allem Wolfram und Neodym) erheblich von denen beim Uran. Zweitens hat die mittel- bis langfristige Verfügbarkeit von Uran durch den 2011 beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergienutzung aus deutscher Sicht erheblich an rohstoffpolitischer Bedeutung eingebüßt. Dennoch bleibt Uran in vielen Ländern weltweit auf absehbare Zeit ein bedeutsamer Rohstoff.

In den meisten Business-as-usual-Szenarien zum globalen Energiebedarf wird von einem kräftigen Anstieg in den nächsten Dekaden ausgegangen, ausgelöst vor allem durch ein dynamisches Wirtschaftswachstum in Ländern wie China und Indien. So rechnet beispielsweise die Internationale Energieagentur (IEA) in ihrem »World Energy Outlook« damit, dass der weltweite Stromverbrauch kontinuierlich um durchschnittlich 2 % pro Jahr zunehmen wird. Dies entspricht einem kumulierten Zuwachs von etwa 50 % bis 2035. Welchen Anteil daran die Stromerzeugung aus Kernenergie übernehmen kann, wird international durchaus kontrovers gesehen, insbesondere seit der Katastrophe in Fukushima am 11. März 2011. In einigen Ländern, vor allem in Asien, wird weiterhin an einem Ausbau der Kernenergie festgehalten, sodass bei einer Reihe von Energieszenarien von einem wesentlichen Anstieg der Stromerzeugung aus Kernenergie bis 2035 ausgegangen wird, angeführt von den Ländern China, Indien, Korea und Russland.

Alle gegenwärtig betriebenen Kernkraftwerke und auch jene, die sich im Bau oder in Planung befinden, sind auf Uran als Brennstoff angewiesen. Der jährliche globale Uranbedarf beträgt derzeit etwa 70.000 t. Die Verfügbarkeit von Uran ist damit ein Schlüsselfaktor für den zukünftigen Ausbau sowie den mittel- bis langfristigen potenziellen Beitrag der Kernenergie zur Stromerzeugung. Im vorliegenden Diskussionspapier wird der aktuelle Wissensstand zu



Uranressourcen und zur Uranproduktion beschrieben und auf dieser Grundlage Abschätzungen zur zukünftigen Versorgungssituation entwickelt.

Uranerz: Vorkommen und Abbaumethoden

Uranhaltiges Erz befindet sich weltweit in Lagerstätten unterschiedlichen geologischen Ursprungs, die sich zum einen durch magmatische (partielles Aufschmelzen von Gestein und Erstarren von silikatischen Schmelzen) und zum anderen durch hydrothermale Prozesse (Ausfällung aus heißen wässrigen Lösungen) erklären lassen. Der Urangehalt von derzeit im Abbau befindlichen Lagerstätten weist eine für Erze ungewöhnlich große Bandbreite auf: von 0,02 % bis (in Ausnahmefällen) nahezu 20 %. Drei Abbaumethoden werden typischerweise zur Urangewinnung eingesetzt.

Tagebau

Etwa 25 % des weltweit geförderten Urans stammen aus dem Tagebau. Dem Vorteil der relativ leichten Zugänglichkeit an der Oberfläche steht der Nachteil des hohen Flächenbedarfs für die Grube und der Abraumhalden gegenüber. Einige der weltweit größten Uranlagerstätten werden im Tagebau abgebaut (Ranger, Australien; Rössing, Namibia; Arlit, Niger; McClean Lake, Kanada; Langer Heinrich, Namibia). Zur Illustration der Größenordnung der Urangewinnung im Tagebau hier ein Beispiel: Die Grube der Rössing-Mine, die seit Jahren zu den größten Uranproduzenten weltweit gehört, ist inzwischen 330 m tief. Allein 2010 wurden über 40 Mio. t Gestein bewegt. Für den Minenbetrieb werden etwa 6 % des gesamten namibischen Stromverbrauchs sowie eine enorme Menge an Frischwasser (ca. 3 Mio. m³ pro Jahr) benötigt.

Untertagebau

Knapp 30 % des produzierten Urans werden im Untertagebau gefördert, wobei in den letzten Jahren eine deutlich fallende Tendenz zu beobachten ist. Untertagebau involviert den kostenintensiven Vortrieb von Schächten und Stollen, hat aber den Vorteil, dass weniger Nebengestein anfällt und der Eingriff in die Landschaft deutlich geringer ist als beim Tagebau. In der mit Abstand größten Uranmine, McArthur River in Kanada, wird Uran im Untertagebau gefördert.

Sowohl beim Tage- als auch beim Untertagebau wird das geförderte Erz erst gebrochen, dann zu einem feinen Pulver gemahlen und schließlich mit Wasser versetzt als Schlamm in Laugungstanks gepumpt. Darin wird mittels Säurezusatz das Uran in Lösung gebracht, gereinigt und anschließend als Yellowcake (Gelbkuchen) ausgefällt.



In-situ-Leaching

Bei diesem Verfahren werden Lösungsmittel (z. B. Schwefelsäure oder Natriumcarbonat) über Hunderte von Bohrungen direkt in die erzhaltigen Gesteinsschichten eingebracht, um das Uran zu mobilisieren. Die uranhaltige Lösung wird anschließend wieder an die Oberfläche gepumpt und daraus das Uran gewonnen. Dank der relativ niedrigen Abbaukosten kann diese Methode auch bei Erzen mit geringem Urangehalt wirtschaftlich sein. Allerdings ist dies nur unter ganz bestimmten geologischen Bedingungen möglich (hohe interne Permeabilität, Gesteinskörper, die frei von Störungen sind). Des Weiteren besteht unter Umständen das Risiko, dass stark uranhaltige Lösungen austreten und Böden bzw. Gewässer kontaminieren. Der Anteil des mit diesem Verfahren gewonnenen Urans hat sich im letzten Jahrzehnt von 20 auf 45 % der weltweiten Produktion erhöht, hauptsächlich wegen des vermehrten Einsatzes der Methode in Kasachstan, das mittlerweile weltgrößter Uranproduzent ist, sowie in Usbekistan. Die größten In-situ-Leaching-Minenprojekte liegen in Kasachstan (unter anderem im Feld Budenovskoye).

Uran als Nebenprodukt

Als eine Variante der Urangewinnung hat der Abbau als Nebenprodukt eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Hier findet der Abbau zwar klassisch unter Tage oder im Tagebau statt, es wird aber hauptsächlich ein anderes Mineral gefördert, wie Gold oder Kupfer, und das Uran fällt nur als Zweit- oder Nebenprodukt an. Das bedeutendste Beispiel ist die Mine Olympic Dam in Australien, in der als Hauptprodukt Kupfer gewonnen wird. Der Urangehalt im Erz beträgt lediglich 0,02 bis 0,05 %. Diese Mine zählte in den letzten Jahren meist zu den drei weltweit größten Uranerzeugern und erschließt die mit Abstand größte bekannte Uranlagerstätte.

Unkonventionelle Uranressourcen

Von unkonventionellen Uranressourcen wird gesprochen, wenn Uran nur als untergeordnetes Nebenprodukt oder aus sehr niedriggradigen Mineralisationen gewonnen werden kann. Unter diesen ist Uran, das aus phosphathaltigem Gestein bei der Gewinnung von Phosphat (Grundstoff für Düngemittel) mitproduziert werden kann, am bedeutsamsten. Typischerweise können allerdings nur etwa 40 g Uran/t geschürftem Gestein gewonnen werden. Falls entsprechende, geplante Anlagen in Brasilien in Betrieb gehen sollten, wären kleinere Beiträge zur Uranversorgung denkbar (bis zu 1.600 t jährlich). Beachtliche Mengen Uran können in Schwarzschiefergesteinen enthalten sein. Allerdings ist der Urangehalt fast immer so niedrig (50 bis 250 ppm), dass ein Abbau derzeit nicht wirtschaftlich ist. Ähnlich verhält es sich bei bestimmten kohle- bzw. lignithaltigen



Gesteinen (Lignit ist eine Vorstufe von Kohle), die einen noch geringeren Uran-gehalt aufweisen.

Allein wegen seiner enormen Menge stellt Meerwasser ein riesiges Uranre-servoir dar. Rund 4 Mrd. t U sind in den Weltozeanen enthalten. Allerdings ist die Konzentration von lediglich 0,003 bis 0,004 ppm äußerst gering und beträgt im Vergleich nur etwa ein 10.000stel der niedergradigsten heute operierenden Minen. Aus diesem Grund wäre ein enormer – auch energetischer – Aufwand erforderlich, um in großtechnischem Maßstab Uran aus dem Meerwasser zu gewinnen. Eine praktisch umsetzbare Technologie steht hierfür trotz einiger Forschungsbemühungen noch nicht zur Verfügung. Es ist absehbar, dass dies – wenn überhaupt – nur bei extrem hohen Uranpreisen wirtschaftlich realisierbar wäre.

Unkonventionelle Uranressourcen spielen gegenwärtig keine Rolle auf dem Uranmarkt und dies wird in der absehbaren Zukunft so bleiben. Kleinere Bei-träge sind aber zukünftig denkbar.

Ressourcen und Reserven

Bei den Ressourcen ist eine Klassifizierung nach dem Grad der Sicherheit ihres Vorkommens gebräuchlich. Zunächst wird dabei zwischen identifizierten und unentdeckten Ressourcen unterschieden. In diesem Diskussionspapier wird sich vorwiegend den identifizierten Ressourcen gewidmet. Diese werden wieder-um differenziert in verhältnismäßig gesicherte Ressourcen (Reasonably as-sured Resources – RAR) und vermutete Ressourcen (Inferred Resources – IR).

- › RAR befinden sich in gut untersuchten Lagerstätten mit gesicherten Kennt-nissen über Größe, Urangehalt und Konfiguration, sodass die mit vorhan-dener Technologie innerhalb bestimmbarer Kostenbereiche abbaubare Menge belastbar beziffert werden kann. Üblicherweise werden heute fol-gende Klassen der Produktionskosten verwendet: < 40 US-Dollar/kg, < 80 US-Dollar/kg, < 130 US-Dollar/kg sowie < 260 US-Dollar/kg.)
- › IR sind Ressourcen, deren Existenz auf Basis geologischer Evidenz oder der möglichen Erweiterung gut explorierter Lagerstätten gefolgert wird. Um sie als RAR zu klassifizieren, bedarf es aber noch weiterer direkter Messungen (z. B. Analyse von Bohrkernen).

Als Reserven (echte Teilmenge der Ressourcen) werden diejenigen Ressourcen klassifiziert, für die neben dem generellen Interesse an einem Erzvorkommen bereits die ökonomische Machbarkeit des Uranabbaus demonstriert wurde. Die Angabe der Reserven ist daher eigentlich bedeutsamer für die Einschätzung der möglichen Uranverfügbarkeit in der näheren Zukunft, aber es liegen keine glo-balen Daten vor, sodass eine Abschätzung für weltweit vorhandene Reserven schwierig ist.

Datenlage

Zur Erfassung der Uranressourcen (unter Einschluss der Reserven) gibt es keine international verbindliche einheitliche Vorgehensweise. Im vorliegenden Diskussionspapier wird sich zu großen Teilen auf Angaben der Organisation for Economic Co-operation and Development und Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) sowie der International Atomic Energy Agency (IAEA) gestützt, die Anstrengungen unternehmen, die Angaben der uranföhrernden Staaten einigermaßen zu vereinheitlichen. Die Ergebnisse werden alle 2 Jahre im Red Book der OECD-NEA/IAEA veröfentlicht. Allerdings sind die dort publizierten Angaben nur begrenzt zuverlssig. Diese liegen in unterschiedlichen Interpretationen, uneinheitlichen Standards, mangelnder Transparenz, teils lückenhafter Quellenlage, aber auch in nicht auszuschließenden interessengeleiteten Bewertungen begründet. Die im Red Book zusammengefassten Daten basieren nicht auf Analysen, die üblichen wissenschaftlichen Standards genügen, geschweige denn auf unabhängig erhobenen geologischen Informationen. Daher werden in diesem Diskussionspapier auch Ergebnisse alternativer Datenerhebungen dargestellt.

Primäre Ressourcen

Primäre Ressourcen sind solche, die direkt aus dem Bergbau stammen. Insgesamt werden im Red Book der OECD-NEA/IAEA (Stand Anfang 2011) weltweit etwa 4,4 Mio. t RAR über alle Kostenklassen ausgewiesen. Ein Großteil davon findet sich in Australien (27 %), gefolgt von den USA (11 %), Kanada (10 %), Kasachstan (9 %), Namibia (8 %), Niger (8 %), Russland (5 %) und Südafrika (4 %). Insgesamt 93 % der RAR befinden sich in nur 12 Ländern.

Für die mittelfristige Versorgung sind RAR mit Produktionskosten von weniger als 130 US-Dollar/kg U von besonderer Bedeutung. Deren Summe beträgt etwa 3,5 Mio. t U.

Weltweit sind 7,1 Mio. t U als identifizierte Ressourcen ausgewiesen. Hier liegen die größten Anteile in Australien (25 %), Kasachstan (12 %), Russland (9 %), Kanada (9 %), Namibia (7 %), USA (7 %), Niger (6 %), Südafrika (5 %) und Brasilien (4 %). 90 % der gesamten identifizierten Ressourcen konzentrieren sich auf lediglich 12 Länder.

Vergleicht man die Angaben im Red Book der OECD-NEA/IAEA über den Ressourcenstand der letzten Dekade, sind zwei Phänomene auffällig. Einerseits wurde 2009 eine neue Kostenkategorie eingeführt (Abbauskosten von bis zu 260 US-Dollar/kg), andererseits schrumpfen die Ressourcen in den niedrigen Kostenkategorien (<40, <80 sowie <130 US-Dollar/kg) weit schneller, als sie physisch abgebaut werden, d.h., sie wurden sukzessive in höhere Kostenkategorien umklassifiziert. Während 2005 noch knapp 2 Mio. t in der RAR-Kategorie <40 US-Dollar/kg ausgewiesen wurden, waren es 2011 nur noch knapp



500.000 t. Dahinter steht im Wesentlichen eine gemeinsame Ursache, nämlich der Trend zu höheren Kosten im Uranabbau.

Im Rahmen des Projekts wurde eine detaillierte Evaluierung aller zu diesem Zeitpunkt bekannten Uranlagerstätten durchgeführt, wobei teilweise auch unkonventionelle Ressourcen einbezogen wurden (Frimmel 2010). Diese führte zu abweichenden Aussagen bezüglich der Gesamtsumme identifizierter Ressourcen im Vergleich zum Red Book der OECD-NEA/IAEA: Insgesamt sollten danach 8,75 Mio. t U an identifizierten Ressourcen vorhanden sein, was deutlich oberhalb der Red-Book-Angaben liegt. Die Diskrepanz erklärt sich größtenteils aus spezifischen Einschätzungsunterschieden von Ressourcen in bestimmten Ländern und Minen. Das betrifft insbesondere Olympic Dam und die australischen Ressourcen insgesamt (1.260 kt), die Halden des südafrikanischen Goldbergbaus (800 kt), schwarzschiefergebundene Vorräte (Viken in Schweden: 455 kt), an Granit gebundene Vorräte (Namibia: 230 kt), Brasilien (-220 kt), Kasachstan (-200 kt), USA (-130 kt), Jordanien (-110 kt) und China (-60 kt). In den produzierenden Minen sollte noch eine Gesamtmenge von 4,56 Mio. t U enthalten sein. Allerdings sind davon nur etwa 350.000 t U als Reserven klassifiziert, d. h., sie sind auch nachweislich wirtschaftlich abbaubar.

Der Vergleich der beiden Ressourcenschätzungen verdeutlicht den breiten Spielraum, der bei der Bewertung von Uranressourcen existiert. Die – in einigen Publikationen teilweise suggerierte – Genauigkeit und Verlässlichkeit derartiger Angaben sollten daher stets kritisch hinterfragt werden.

Uranexploration

Die weltweiten Explorationsaufwendungen haben seit etwa 2003 wieder erheblich zugenommen, aber bislang nicht zu wesentlichen echten Neuentdeckungen geführt (Greenfieldsexploration an Orten, die noch nicht untersucht wurden). Trotz großer Anstrengungen war die Suche nach einer großen Lagerstätte vom Typ Olympic Dam nicht erfolgreich. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies innerhalb des nächsten Jahrzehnts gelingt, ist als sehr gering einzuschätzen. Gegenwärtig dominiert die Brownfieldsexploration, die im Wesentlichen in der Umgebung bestehender Minen durchgeführt wird, um für die laufende Produktion neue Reserven zu erschließen.

Im Gegensatz zur häufig suggerierten Erwartung, dass Explorationsaufwendungen quasi automatisch mit Neuentdeckungen von Ressourcen korrelieren, ist aus wissenschaftlicher Sicht kein nachweislicher Zusammenhang zwischen Explorationsausgaben und der Entdeckung neuer Uranressourcen erkennbar.

Sekundäre Ressourcen

Seit mehr als 2 Jahrzehnten wird die Nachfrage nach Uran neben der primären bergmännischen Urangewinnung aus zusätzlichen sekundären Uranressourcen



gedeckt. Dieses Uran liegt heute in verschiedenen chemischen Formen und Anreicherungsgraden vor, daher werden diese Mengen zur besseren Vergleichbarkeit in Natururanäquivalent (U^*) umgerechnet. Die sekundären Ressourcen umfassen sowohl Lagerbestände, in Form von zivilen Reserven oder militärischem Waffenuran, als auch Abfallprodukte aus dem nuklearen Brennstoffkreislauf, wie abgereichertes Uran und Uran in abgebrannten Brennelementen. Zusätzlich kann auch die Uranersparnis durch den Einsatz plutoniumhaltiger Brennstoffe als Uranressource betrachtet werden.

Von 1992 bis 2013 wurden im Rahmen eines Abkommens zwischen Russland und den USA¹ («Megatons to Megawatts Program») 500 t russischen Waffenurans in Reaktorbrennstoff umgewandelt und in US-amerikanischen Kernkraftwerken eingesetzt. Die Menge entspricht einem Natururanäquivalent von etwa 100.000 t. Während der Laufzeit des Abkommens wurden auf diese Weise etwa 7 % des globalen Uranbedarfs gedeckt. Eine Fortsetzung dieses Programms ist nicht zu erwarten. Zurzeit läuft noch ein Programm des U.S. Department of Energy, das zwischen 2010 und 2017 US-amerikanisches Waffenuran im Umfang von 21.000 t U^* umsetzen soll. Theoretisch besteht die Möglichkeit, dass weitere Waffenuranmengen in den USA und Russland zu Reaktorbrennstoff umgewandelt werden könnten. Es gibt aber weder aktuelle Planungen dafür noch sind entsprechende Absichten für die absehbare Zukunft erkennbar.

Die zivilen Lagerbestände lagen (Stand 2009) bei 154.000 t U^* . 130.000 t davon lagen bei Reaktorbetreibern (damit ließe sich die derzeitige globale Reaktorflotte etwa 2 Jahre betreiben), der Rest bei Minenunternehmen und uranverarbeitenden Firmen. Der größte Teil davon sind strategische Reserven (teilweise aufgrund nationaler Vorschriften), sodass nur etwa 20.000 t für den Uranmarkt verfügbar gemacht werden könnten. Von weiteren verborgenen zivilen Lagerbeständen ist nicht auszugehen.

Bei der Anreicherung von Natururan zu Reaktorbrennstoff, der einen höheren Gehalt am spaltbaren Uranisotop U-235 aufweist, bleibt als Abfall abgereichertes Uran (mit kleineren U-235-Gehalten als Natururan) zurück. Im Prinzip könnte dieses abgereicherte Uran erneut einer Anreicherungsanlage zugeführt und nochmals angereichert werden. Theoretisch hat diese Wiederanreicherung ein sehr hohes Mengenpotenzial (in der Größenordnung 500.000 t U^*). Aber viele Gründe sprechen gegen eine Realisierung: erhebliche Zusatzkosten für die Anreicherungsarbeit, fehlende verfügbare Anreicherungs-kapazitäten sowie die energetische Ineffizienz der Wiederanreicherung. Daher gab es bislang nur kurzfristig und unter sehr speziellen Randbedingungen ein kleines russisch-europäisches Wiederanreicherungsprogramm (Größenordnung 1.000 t U^* jährlich).

Das theoretische Potenzial der Natururanersparnis durch die Nutzung von Plutonium als Spaltstoff in Uran-Plutonium-Mischoxid(MOX)-Brennstoff liegt

¹ Agreement between the Government of the Russian Federation and the Government of the United States of America concerning the disposition of highly-enriched Uranium extracted from nuclear weapons



für die Summe der militärisch und zivil erzeugten Plutoniumbestände (je etwa 250 t) bei etwa 80.000 t U*. Die MOX-Nutzung von zivilen Plutoniumbeständen findet – insbesondere wegen der im Vergleich zu Uranbrennstoff deutlich höheren Kosten – nur in der Größenordnung einer Natururanersparnis von 1.000 t U* pro Jahr statt. Gemäß einer US-amerikanisch-russischen Vereinbarung zur Vernichtung von Waffenplutonium sollen im Zeitraum 2017 bis 2025 je 34 t Plutonium durch den Einsatz in Reaktoren unschädlich gemacht werden. Dies würde ebenfalls etwa 1.000 t U* pro Jahr einsparen, allerdings ist unklar, ob das Programm wie geplant umgesetzt wird.

Insgesamt zeigt sich, dass das theoretische Potenzial sekundärer Uranressourcen zwar recht hoch ist, aber das realistisch nutzbare Potenzial – zumindest für die nächsten beiden Jahrzehnte – nur einen geringen Bruchteil dieser Mengen darstellt. Sekundäre Ressourcen werden weiterhin eine wichtige ergänzende Rolle für die Uranversorgung spielen, die aber nach wie vor hauptsächlich durch primäre Ressourcen gedeckt werden muss. Nach derzeitigem Stand wird die Verfügbarkeit sekundärer Ressourcen tendenziell weiter sinken, es ist aber nicht auszuschließen, dass sie mittelfristig auch wieder auf den Stand von 2010 ansteigen könnte.

Produktion und Nachfrage: aktueller Status

Deckungslücke

Die globale Uranförderung hat in ihrer knapp 70-jährigen Geschichte zwei deutliche Maxima erlebt. Das erste 1959 mit etwa 50.000 t spiegelt den Höhepunkt der nuklearen Aufrüstung wider, das zweite 1980 mit 70.000 t U war Folge der globalen Wachstumserwartung für die Kernenergie zu jener Zeit. Das Überangebot an Uran führte zu sinkenden Uranpreisen und damit zu sinkenden Produktionszahlen mit der Folge, dass die jährliche Produktion hinter dem Bedarf zurückblieb. Bis 1990 lag die Produktion über dem jährlichen Bedarf für zivile Zwecke, danach stets darunter. 1999 konnte nur noch die Hälfte des Bedarfs aus der direkten Produktion gedeckt werden. Der Rest stammt seither aus Lagerbeständen und weiteren sekundären Ressourcen.

Obwohl diese Lücke auch heute noch existiert, konnte sie in den vergangenen Jahren sukzessive verkleinert werden und betrug 2012 nur noch 16% des Bedarfs, der gegenwärtig bei knapp 70.000 t liegt (hier ist der Bedarf für die japanischen Reaktoren von etwa 7.000 bis 8.000 t noch eingeschlossen). Die Reduktion der Lücke zwischen Produktion und Bedarf konnte durch einen starken Ausbau der primären Produktion in Kasachstan erreicht werden.

Importabhängigkeit

Die aktuell größten uranproduzierenden Länder sind weitgehend identisch mit den Ländern mit den größten Uranvorkommen. Kasachstan ist mittlerweile zum weltgrößten Produzenten aufgestiegen und fördert 36 % (Stand 2012) der globalen Uranproduktion. Kanada und Australien tragen weitere 15 bzw. 12 % zur Weltproduktion bei, womit fast zwei Drittel der Uranproduktion aus nur drei Ländern stammen. Knapp 80 % der weltweiten Uranproduktion finden in fünf Ländern (zusätzlich Niger und Namibia) statt. 98 % der Weltproduktion erfolgen in 12 Ländern.

Ein detaillierter Blick auf die Produzentenländer zeigt, dass diese ganz andere als die Konsumenten sind. Nur zwei Länder mit Kernenergieprogrammen sind derzeit in der Lage, ihren Eigenbedarf an Uran vollständig zu decken (Kanada und Südafrika). Russland kann sich – zumindest rein rechnerisch – zu etwa 80 % selbst versorgen. Alle anderen Länder sind weitgehend oder vollständig von Uranimporten abhängig (unter anderem Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Japan, Schweden, Spanien, Südkorea, Ukraine, USA). Die europäischen Länder sind fast vollständig auf Importe angewiesen.

Limitierungen und Schwierigkeiten bei der Uranproduktion

Eine Reihe wesentlicher bzw. möglicher Limitierungen und Schwierigkeiten bei der Uranproduktion macht deutlich, dass der Versuch einer Prognose zur zukünftigen globalen Uranproduktion durchaus problematisch ist. Da weltweit nur eine geringe Anzahl von Produktionsstätten für einen großen Anteil der jährlichen Produktion verantwortlich ist, besteht die Gefahr, dass bei Ausfall einzelner Standorte oder bei Verzögerung der Inbetriebnahme neuer Standorte – zumindest kurzfristig – beträchtliche Lücken in der Produktion auftreten können, die nicht einfach durch andere Minen aufgefangen werden können. Für praktisch jede der großen betrachteten Minen kann eine Schwachstelle identifiziert werden, die quasi alleine Ursache für einen zeitweisen Totalausfall, für Produktionsrückgänge oder für Verzögerungen beim Ausbau der Mine sein kann (unter anderem Wassereinbrüche, defekte Förderanlagen, hoher Wasserbedarf, Anfälligkeit für Naturkatastrophen bzw. Streiks). Weiterhin führen Umwelt- und Gesundheitsfolgen bzw. -risiken (insbesondere durch radioaktive und anderweitig toxische Abraumengen, Abwässer und Schlämme) zu Akzeptanzproblemen. Umweltauflagen, Genehmigungserfordernisse und Eigentumsrechte indigener Völker können dementsprechend die Inbetriebnahme von Minenprojekten erschweren.

Einerseits wird oft argumentiert, dass die derzeitige weltweite Verteilung der Produktionsstätten diversifiziert genug erscheint, um die Wahrscheinlichkeit ernsthafter Lieferengpässe bedingt durch das Ausfallen eines Produzenten in einem bestimmten Land (z. B. aufgrund politischer Unruhen oder technischer Probleme) als relativ gering einzustufen. Andererseits ist es äußerst unge-



wöhnlich für einen Energierohstoff, dass die Hälfte der weltweiten Produktion auf lediglich sieben oder acht Produktionsstätten konzentriert ist, wie es beim Uran der Fall ist. Störungen in einzelnen Minen könnten sich demnach erheblich auf die Versorgungslage auswirken. Hinzu kommt, dass knapp zwei Drittel der Uranproduktion in der Hand von den vier Unternehmen Cameco Corporation, Rio Tinto Group, Areva S.A. und Kazatomprom JSC NAC sind.

Zukünftige Verfügbarkeit von Uran

Die mittel- und langfristige Zukunft der Uranversorgung muss sich im Wesentlichen auf den Bergbau stützen. Während für die Einschätzung der langfristigen Verfügbarkeit (bis etwa 2050) eine Bewertung der Menge der vorhandenen (bzw. neu zu entdeckenden) Ressourcen entscheidend ist, treten für die Beurteilung der Versorgungssituation in der mittelfristigen Zukunft (in diesem Diskussionspapier 2030/2035) die Fragen in den Vordergrund, ob bekannte Ressourcen zeitgerecht erschlossen werden können und wie hoch die tatsächliche Produktion der (bestehenden und neu zu errichtenden) Minen sein wird.

Da eine quantitative in die Zukunft gerichtete Abschätzung der Uranproduktion auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis, die in vielfacher Hinsicht unvollkommen bzw. unzuverlässig ist, notwendigerweise auf heuristischen Annahmen beruhen muss, wurden im Rahmen des Projekts zwei Gutachten vergeben, in denen unabhängig voneinander mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen Verfügbarkeitszenarien entwickelt wurden (Kasten). Dass beide Gutachten – bei allen Unterschieden im Detail – qualitativ ähnliche Ergebnisse zeigen, validieren die hier getroffenen Einschätzungen.

Langfristige Reichweite von Uran

Die einfachste Form der Einschätzung der Reichweite von Uranressourcen ist die statische Reichweite. Hier trifft man die Annahme, dass der Uranbedarf in Zukunft konstant auf heutigem Niveau verbleibt. Abhängig davon, welche Ressourcenmenge als verfügbar angenommen wird, ergibt sich eine Reichweite in Jahren. Hierfür existiert ein erheblicher Spielraum, der sich in einer entsprechend großen Bandbreite für den Zeitraum ausdrückt: Wenn tatsächlich alle heute bekannten und vermuteten Uranressourcen (RAR u. IR) technisch und wirtschaftlich ausbeutbar wären, würde sich eine theoretische Reichweite von 100 bis 150 Jahren ergeben. Wenn nur die heute als gesichert abbaubar geltenden Uranressourcen betrachtet werden (RAR aller Kostenkategorien), verringert sich dieser Horizont auf etwa 65 Jahre. Die RAR in der (wirtschaftlich bedeutsamen) Produktionskostenkategorie < 130 US-Dollar/kg U wären bereits nach etwa 50 Jahren erschöpft. Wegen ihrer Einfachheit trifft man die statische Reichweite in der öffentlichen Diskussion verbreitet an, ihre Aussagekraft ist jedoch limitiert, da sie auf stark simplifizierenden und zum Teil fiktiven Annahmen beruht.

Im Fall eines massiven Ausbaus der Kernenergie (Kasten) wäre die Menge der relativ gesicherten Ressourcen (RAR aller Kostenkategorien) bereits bis 2050 aufgebraucht. Ein massiver weltweiter Kernenergieausbau (mit uranbetriebenen Reaktoren) wäre daher allein aufgrund der Begrenztheit der verfügbaren Uranressourcen kaum realistisch.

Mittelfristige Uranverfügbarkeit bis 2030/2035

In beiden Szenarien (Frimmel 2010; IANUS 2011; Kasten) wird deutlich, dass zunächst mit einem Anstieg der primären Uranproduktion zu rechnen ist, innerhalb der 2020er Jahre aber ein rascher Rückgang der jährlichen Förderkapazität erwartet wird. Im Bedarfsfall »Low Case« erscheint es unter Umständen noch möglich, die entstehende Versorgungslücke bis 2035 durch akkumulierte Vorräte aus der zunächst vorhandenen Überproduktion bzw. durch verstärkten Rückgriff auf sekundäre Ressourcen zu decken. Bei höherem Uranbedarf (»High Case«) würde es allerdings spätestens 2030 zu einem zunehmenden Versorgungsengpass kommen.

Methodische Herangehensweise bei den Verfügbarkeitszenarien

Die beiden entwickelten Szenarien zur Verfügbarkeit von Uran – zum einen von Prof. Dr. H.E. Frimmel, zum anderen von der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit der TU Darmstadt (IANUS) – unterscheiden sich im methodischen Ansatz.

Uranproduktion

Frimmel (2010): Zeithorizont 2035

Detaillierte Analyse der vorhandenen geologischen Ressourcen sowie von Minenprojekten in unterschiedlichen Umsetzungsstadien. Neben allen bedeutenden heute produzierenden Minen (mit mehr als 2 % der globalen Produktion) wurden Minenprojekte berücksichtigt, deren technisch-ökonomische Machbarkeit bereits nachgewiesen wurde (Feasibility Study liegt vor) sowie Minenprojekte, bei denen Voruntersuchungen vielversprechend waren (Pre-Feasibility Study). Hierfür spielte die Nutzung der spezialisierten Fachdatenbank »Raw Materials Data« von IntierraRMG (Schweden) eine zentrale Rolle.

IANUS (2011): Zeithorizont 2030/2050

Es wurde ein Szenariobündel entwickelt, das auf einer detaillierten Analyse von 29 repräsentativen Minen und Minenprojekten in 12 Ländern beruht. 19 dieser Minen sind bereits in Betrieb, 10 befinden sich im Bau oder in der

Planung. Diese Minen enthalten etwa drei Viertel aller identifizierten Ressourcen und decken knapp zwei Drittel der Weltproduktion (Stand 2009). Angaben über tatsächliche und prognostizierte Produktionsmengen und zukünftige Kapazitätsentwicklungen wurden aus Geschäftsberichten und Fachpublikationen entnommen. Da bei fast allen Minen die reale Produktion – teilweise deutlich – hinter der Kapazitätsangabe zurückbleibt, wurden hierfür spezifische Korrekturfaktoren definiert. Im Gegensatz hierzu werden in den meisten einschlägigen Publikationen solche Faktoren nicht berücksichtigt. Bei den sekundären Ressourcen wurde nach eingehender Analyse ein minimal sowie ein maximal zu erwartender Beitrag abgeschätzt und diese Bandbreite bei den Verfügbarkeitsszenarien einbezogen.

Uranbedarf

Neben den im Red Book 2009 der OECD-NEA/IAEA (2010) definierten Bedarfsfällen »Low Case« und »High Case« wurden zwei Bedarfsszenarien mit »massivem Ausbau« und »sehr massivem Ausbau« herangezogen. In den beiden OECD-NEA/IAEA-Szenarien wird von einem moderaten Wachstum der Kernenergiekapazität von 375 GW (2011) auf etwa 510 GW (»Low Case«) bzw. 780 GW (»High Case«) für 2035 ausgegangen. In den beiden anderen Szenarien wird die Vision einer nuklearen Renaissance mit dem Ziel repräsentiert, Kernenergie global soweit auszubauen, dass sie einen signifikanten Beitrag zur Lösung des globalen Klimaproblems leisten könnte. Das Szenario »massiver Ausbau« unterstellt, dass 2050 ein Drittel des weltweiten Strombedarfs nuklear erzeugt wird. Dies entspräche einer Vervierfachung der Kernkraftwerkskapazität bis 2050. Im Szenario »sehr massiver Ausbau« steigt der Kernenergieanteil bis 2070 noch weiter an und beträgt dann 50 % der Stromerzeugung. In Tabelle Z.1 ist der Uranbedarf für diese Szenarien in den Stützjahren 2030/2035 dargestellt. Zum Vergleich betrug der weltweite Bedarf 2011 etwa 70 kt U.

Tab. Z.1 Bedarfsszenarien für Uran pro Jahr

Szenario	konstant wie 2011 in kt U	Red Book »Low Case« in kt U	Red Book »High Case« in kt U	»massiver Ausbau« in kt U	»sehr massiver Ausbau« in kt U
2030	70	90	125	155	270
2035	70	90	140	185	335

Quellen: IANUS 2011; OECD-NEA/IAEA 2010 gerundet



Eine ganz entscheidende Rolle für die Uranverfügbarkeit im Zeithorizont 2030/2035 spielt die Umsetzung der Ausbaupläne für die große australische Mine Olympic Dam. Der ursprünglich geplante Minenausbau ist bis auf Weiteres zurückgestellt, eine Wiederaufnahme der Pläne erscheint zurzeit unwahrscheinlich. Wird unterstellt, dass dies so bleibt, ist eine ernsthafte Versorgungslücke auch im Bedarfsfall »Low Case« nicht auszuschließen.

Das Szenario »massiver Ausbau« (und »sehr massiver Ausbau«) der Kernenergie würde bereits in der Dekade 2020 bis 2030 erhebliche Versorgungsprobleme aufwerfen, da das dafür benötigte Uran nicht zur Verfügung gestellt werden könnte. Ein massiver Ausbau der Kernenergie ist daher nicht nur langfristig aufgrund der Begrenztheit der verfügbaren Uranressourcen fragwürdig, sondern würde bereits in der Startphase eines schnellen Kernkraftausbaus an einem Mangel an Förderkapazität scheitern.

Bei einer Erhöhung der Förderkapazität ist mit langen Vorlaufzeiten zu rechnen: Bei den letzten größeren Minenprojekten dauerte es von der Entscheidung, eine Mine zu errichten, bis zur tatsächlichen Inbetriebnahme etwa 15 Jahre. Hinzu kommt, dass in den letzten Jahren diese Zeitspanne tendenziell immer länger wurde.

Ein wesentlicher Faktor, der die Versorgungslage kurz- und mittelfristig entspannen könnte, ist der gegenwärtige Stillstand des japanischen Kernenergieprogramms nach Fukushima. Denn die momentan nicht in Betrieb befindlichen japanischen Reaktoren haben einen jährlichen Uranbedarf von etwa 7 bis 8 kt (etwa ein Zehntel des globalen Bedarfs).

Kurzfristige Uranverfügbarkeit bis etwa 2020

Aus den mittelfristigen Szenarien ist ableitbar, dass die primäre Uranproduktion bis etwa 2020 zunächst moderat ansteigt, wobei das Maximum der globalen Uranproduktion für 2022 – gegebenenfalls etwas früher – erwartet wird. Der weltweite jährliche Uranbedarf kann durch die Produktionssteigerung gedeckt werden, auch wenn zu erwarten ist, dass der Beitrag der sekundären Ressourcen weiterhin eine fallende Tendenz aufweist. Versorgungsschwierigkeiten wären innerhalb des laufenden Jahrzehnts nur zu erwarten, wenn in großen Minen gravierende Produktionsausfälle oder bei größeren Minenprojekten weitere Verzögerungen bei der Inbetriebnahme aufträten. Zur Absicherung gegen kurzfristige Lieferengpässe halten Reaktorbetreiber Lagerbestände vor.

Energie- und CO₂-Bilanz

Kernkraftwerke stoßen im Betrieb zwar kein CO₂ aus, dennoch ist in der Gesamtbilanz die Erzeugung von Strom aus Kernenergie keineswegs CO₂-frei. Hierfür müssen die Emissionen entlang der gesamten Nutzungskette betrachtet



werden, angefangen beim Abbau von Uran, über die Anreicherung und Brennelementherstellung, die Errichtung, den Betrieb und den Rückbau der Kernkraftwerke bis hin zur Endlagerung der Abfälle.

Der Uranbergbau ist für einen wesentlichen Anteil der gesamten CO₂-Emissionen verantwortlich. Dabei ist der größte Einflussfaktor der Urangehalt im Erz. Der Grund ist, dass bei niedrigem Urangehalt mehr Gestein und sonstiges Material mit hohem Energieaufwand prozessiert werden muss, um dieselbe Menge Uran zu gewinnen.

Aus prinzipiellen Gründen existiert somit eine kritische Grenze beim Urangehalt, unterhalb derer der Energieaufwand beim Uranabbau höher ist als die aus dem gewonnenen Uran erzeugbare elektrische Energie. Ebenso ist unterhalb eines bestimmten Urangehalts im Erz die CO₂-Bilanz des damit erzeugten Stroms schlechter als beispielsweise bei hocheffizienten Erdgaskraftwerken. Nach ersten überschlägigen Berechnungen könnte diese Grenze bei etwa 0,01 % Urangehalt im Erz liegen.

Allerdings ist der Wissensbestand hierzu noch eher lückenhaft und wenig konsolidiert. Bevor belastbare Einschätzungen getroffen werden können, wären daher sowohl allgemeine als auch standortspezifische Forschungsfragen zu geologischen, verfahrenstechnischen und energiebilanziellen Gesichtspunkten zu klären. Hierfür wäre als erster Schritt allerdings die verifizierbare Offenlegung von Daten der Minenbetreiber erforderlich, die sich bisher diesbezüglich eher wenig kooperativ gezeigt haben.

Da bei Fortsetzung der gegenwärtigen Trends die Zukunft des Uranbergbaus, zumindest ab 2030, bei Uranerzvorkommen mit niedrigem Urangehalt liegen wird, wäre die Entwicklung neuer wesentlich energieeffizienterer Abbauverfahren entscheidend für eine positive Energie- und günstige CO₂-Bilanz der Stromerzeugung aus Uran.

1 Einleitung

Mit dem global steigenden Bedarf an Energie, die mit möglichst geringem Ausstoß von Treibhausgasen zur Verfügung gestellt werden soll, und der zunehmenden Erkenntnis von der Neige gehender, billiger Rohölreserven ist die Kernenergie als primäre Energiequelle in den letzten Jahren in einigen Ländern wieder verstärkt in den Brennpunkt des öffentlichen und auch politischen Interesses gerückt. Für die bestehenden Kernkraftwerke, aber auch die vor allem in asiatischen Ländern geplanten Neubauten, ist Uran der Brennstoff der Wahl. Dies verlangt, vor allem unter Berücksichtigung der Auslegung von Kernkraftwerken auf eine Betriebszeit von 40 bis 60 Jahren, eine Neubewertung der Verfügbarkeit von Uran.

In diesem Diskussionspapier wird der aktuelle Wissenstand zur Uranproduktion und -versorgung zusammengefasst, aber auch Abschätzungen zur zukünftigen Uranversorgung dargelegt.² Es basiert auf folgenden zwei Gutachten, die im Auftrag des Deutschen Bundestages verfasst wurden, wobei beim ersten der Schwerpunkt auf den geologischen Gegebenheiten und dem Uranabbau liegt, und im zweiten sich insbesondere auch mit sekundären Ressourcen beschäftigt wird:

- > Verfügbarkeit von natürlich vorkommendem Uran. Univ.-Prof. Dr. Hartwig E. Frimmel, Leinach
- > Verfügbarkeit von Uran. Dr. Matthias Englert, Moritz Kütt, Dr. Wolfgang Liebert, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt

Für das hier vorgelegte zusammenfassende Diskussionspapier wurden Literaturquellen bis 2012 – stellenweise bis 2014 – berücksichtigt. Die für die Untersuchungen beider Studien zugrundeliegende Datenbasis ist ähnlich. Sie umfasst Fachzeitschriften oder Fachbücher, Firmenberichte aber auch die Website und Publikationen des Industrieverbandes World Nuclear Association (WNA). Für die Erstellung der Studie von Frimmel (2010) spielte die Datenbank »Raw Materials Data« von IntierraRMG (Schweden) eine wichtige Rolle. Weitere Datenquellen sind die Internetdatenbank »World distribution of uranium deposits« (UDEPO) (IAEA 2009) und die Website des nuklearkritischen World Information Service on Energy (WISE).

2 Die diesem Diskussionspapier zugrundeliegenden Gutachten wurden im Wesentlichen vor den Unfällen von Fukushima verfasst, die auch einen Einfluss auf den Uranmarkt hatten. Die zentralen Aussagen im Diskussionspapier gelten weiterhin fort. An einigen Stellen wird knapp auf die veränderte Lage durch den Stillstand des japanischen Kernenergieprogramms eingegangen.



Insbesondere muss an dieser Stelle auf die alle 2 Jahre von der OECD-NEA/IAEA herausgegebene Publikation »Uranium. Resources, production, and demand« (Red Book) hingewiesen werden. Datensammlung und Dateninterpretation werden seit 1965 veröffentlicht und es wird damit versucht, eine aktuelle globale Zusammenschau der Uranressourcen, Produktionszahlen und des Uranbedarfs zu liefern. Die Datenbasis stammt dabei größtenteils von nationalen Behörden der OECD-Mitgliedsländer und von Firmen, die im Minengeschäft aktiv sind. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die erhobenen Daten nicht auf unabhängig verfügbaren geologischen Informationen basieren. Seit Langem bemüht sich das OECD-NEA/IAEA-Sekretariat ein für alle Länder gleiches gemeinsames Datenmuster umzusetzen, was sich als schwierig erweist, weil es keine international einheitliche Vorgehensweise für die Auflistung von Ressourcen und Reserven gibt. Dies zeigt sich schon daran, dass die Uranressourcen in manchen Fällen als in situ, also im Gestein vorhanden, ausgewiesen werden, manchmal aber als die Menge, die bergbaulich gewonnen werden kann, oder aber als jenes Uran, das letztendlich nach Abbau und Durchlaufen der Uranmühle zur Weiterverarbeitung oder Anreicherung zur Verfügung steht. Diese unterschiedlichen Angabevarianten sind für eine akkurate Erstellung einer globalen Datenbasis insofern problematisch, als auf dem Weg vom Gestein bis zum Endprodukt bis zu einem Drittel des Urans verlorengehen kann. Soweit es nachvollziehbar war, wurde versucht, auf die Zahlen zurückzugreifen, die Verluste bei der Urangeinnung bereits berücksichtigen. Dieser Ansatz wird auch vom OECD-NEA/IAEA-Sekretariat verfolgt und ist vor allem für jene Teile der Datenbasis leitend, die nach eigenen Maßstäben des Sekretariats zusammengestellt und interpretiert werden müssen. Letzteres ist teilweise aufgrund unvollständiger, oder komplett fehlender Angaben der Länder notwendig. Insgesamt können die im Red Book der OECD-NEA/IAEA angegebenen Werte also nur als Abschätzung gelten, da viele Daten nicht genau bekannt oder sogar unbekannt sind und teilweise interessengeleiteten Verzerrungen unterliegen. Die suggestive Genauigkeit der gemachten Angaben ist daher vorsichtig zu betrachten. Die erhobenen Daten basieren nicht auf einer auf den üblichen wissenschaftlichen Standards genügenden Analyse, geschweige denn auf unabhängig verfügbaren geologischen Informationen.

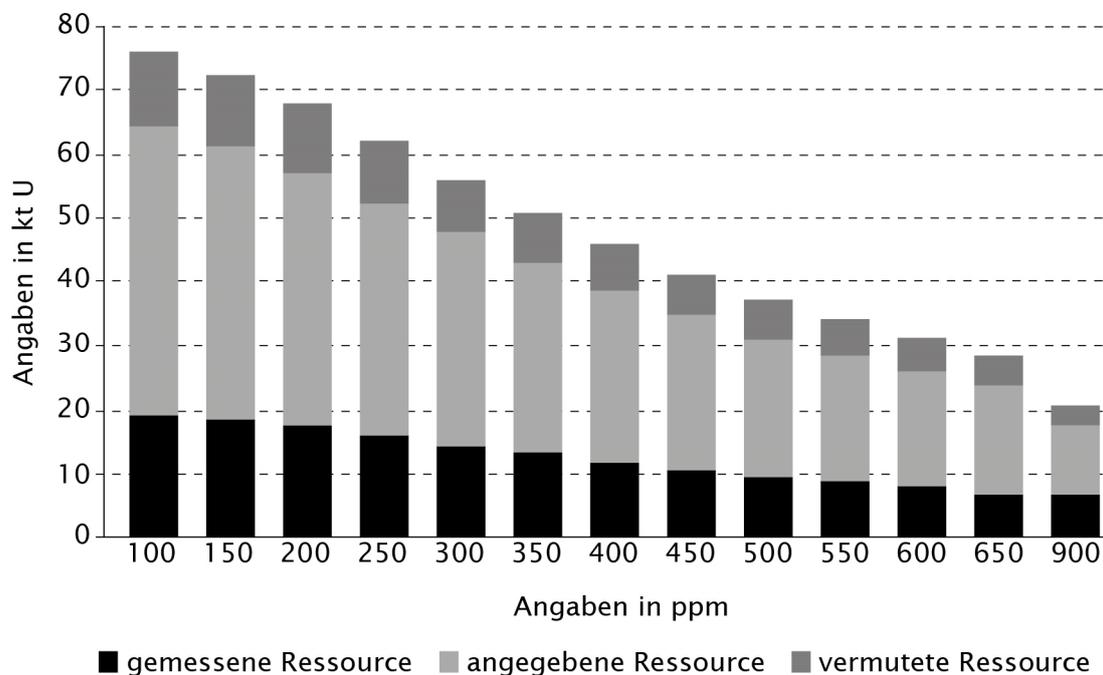
Diese wesentlichen Einschränkungen, die am Beispiel des Red Book der OECD-NEA/IAEA knapp skizziert wurden, gelten im Wesentlichen auch für alle anderen Datenzusammenstellungen. Als Beispiel für die Ungewissheiten in den Angaben ist hier auch der Cut-off-Grad angeführt. Dieser beschreibt den minimalen Urangehalt im Erz, ab dem Gestein in der Lagerstätte als Reserve oder Ressource klassifiziert wird und damit als abbaubar gilt.³

3 Die Definition des Cut-off-Grad wird nicht ganz einheitlich gehandhabt und kann sich auf Reserven und/oder Ressourcen beziehen. Auf jeden Fall spielen hier ökonomische Überlegungen eine wesentliche Rolle. Ein Kriterium kann auch der energetische Aufwand sein, der für den Abbau nötig wird.



In der Abbildung 1.1 sind mögliche Vorkommensdeklarationen für Uran in der Mine Langer Heinrich (Namibia) in Abhängigkeit vom angenommenen Cut-off-Grad aufgeführt. Es wird sichtbar, dass durch eine veränderte Annahme dieses Kriteriums deutlich unterschiedliche Mengen an Reserven zustande kommen können – bei gleichem Kenntnisstand über die Lagerstätte. Selten werden diese Unterschiede so deutlich sichtbar gemacht, wie in der Angabe des Betreibers von Langer Heinrich. In der Regel wählen die Betreiber einen für sie günstigen Cut-off-Grad, ohne dass klar wäre, welche Konsequenzen das für Schätzung der tatsächlichen Reserven hat.

Abb. 1.1 Uranvorkommen in Abhängigkeit vom Cut-off-Grad



Ressourcenabschätzungen für die Lagerstätte Langer Heinrich (Namibia) in Abhängigkeit vom für die Abschätzung berücksichtigten Cut-off-Grad (500 ppm entsprechen 0,05% Urangehalt im Erz)

Eigene Darstellung nach Princep/Hutson 2010

Letztlich bleibt noch anzumerken, dass für die jährliche Produktion der einzelnen Länder nicht immer die gleichen Zahlenwerte in den verschiedenen, zur Verfügung stehenden Quellen zu finden sind. In manchen Fällen liegt die Summe der von den einzelnen Minen gemeldeten Fördermengen deutlich unter der Summe der offiziell angegebenen nationalen Förderung. Seltener liegt die Summe der von den einzelnen Minen gemeldeten Fördermengen aber auch über der offiziellen Gesamtangabe eines Staates. Frimmel (2010) sieht dafür eine Reihe von Ursachen:



- > Für manche Länder liegen nur Schätzungen vor (z. B. Pakistan, Rumänien).
- > Die Produktion wird manchmal in t U, manchmal als U_3O_8 (Yellowcake) dokumentiert. Bei der Umrechnung wird mehr oder weniger stark gerundet, was letztlich zu Ungenauigkeiten führen kann.
- > Manche Firmen berichten nur über Verkäufe, nicht aber über die oft davon abweichende Produktion.
- > Sogar innerhalb eines Landes kann es dazu kommen, dass unterschiedliche staatliche Stellen unterschiedliche Zahlen nennen.



2 Hintergrund

Dieses Kapitel liefert Hintergrundinformationen, um Szenarien und Prognosen zur Uranverfügbarkeit besser verstehen zu können. Es werden Grundlagen zu den Eigenschaften und der Nutzung von Uran, den geologischen Anreicherungsprozessen und den Abbaumethoden vermittelt sowie eine Unterscheidung zwischen konventionellen und unkonventionellen Ressourcen getroffen. Zuletzt wird die derzeitige Uranversorgungs- und Uranmarktsituation dargestellt.

Natururan enthält im Mittel nur einen Anteil von etwa 0,711 % des spaltbaren Isotops U-235, der Rest besteht aus U-238, das sich unter dem Einfluss von Neutronenstrahlung (z.B. in einem Kernreaktor) in Plutonium umwandeln kann. Natururan kann nur in besonderen Reaktortypen (Schwerwasserreaktoren), wie sie vor allem in Indien und Kanada Verwendung finden, direkt zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Der Großteil der weltweit genutzten zivilen Kernreaktoren sind dagegen Leichtwasserreaktoren, zu deren Betrieb der Anteil des Isotops U-235 von 0,711 % auf etwa 3 bis 5 % angereichert werden muss. Für den Einsatz in Kernwaffen wird typischerweise eine Anreicherung von etwa 90 % verwendet.

2.1 Geologie

Uran (U) weist in der oberen kontinentalen Erdkruste (bis etwa 10 km Tiefe), also in dem für den Bergbau zumindest potenziell zur Verfügung stehenden Bereich, eine durchschnittliche Konzentration von 2,7 ppm auf (Rudnick/Gao 2005). Verglichen damit ist in typischen für den Abbau relevanten Uranlagerstätten der Urangehalt etwa 100- bis 10.000-fach höher. Dies liegt daran, dass sich Uran sowohl durch magmatische (partielles Aufschmelzen bzw. fortschreitende Kristallisation einer Gesteinsschmelze) als auch durch hydrothermale Prozesse (Ausfällung aus heißen Lösungen oder wässrigen Fluiden) in geologischen Formationen anreichern kann.

Daraus resultiert eine Vielzahl von Uranvererzungstypen. Die International Atomic Energy Agency verwendet eine Klassifizierung mit vier Haupttypen, die in 15 Untertypen differenziert werden (OECD-NEA/IAEA 2010). Diese Klassifizierung wird jedoch in der Fachliteratur nicht einheitlich gehandhabt.

Da eine umfassende Behandlung aller dieser Lagerstättentypen den Umfang dieses Diskussionspapiers sprengen würde, werden im Weiteren lediglich die drei Typen exemplarisch vorgestellt, die – mit zusammengenommen 85 % der derzeitigen Uranförderung weltweit – ökonomisch am bedeutendsten sind (Cuney/Kyser 2009: 257).

2.1.1 Uran in IOCG-Lagerstätten

IOCG-Lagerstätten (Iron Oxide Copper-Gold Deposits) sind ein erst in jüngerer Zeit erkannter hydrothermalen Lagerstättentyp, der zwar zunehmende wirtschaftliche Bedeutung genießt, dessen Genese aber noch weitgehend ungeklärt ist. Das mit Abstand bedeutendste Beispiel von IOCG-Lagerstätten ist Olympic Dam in Südaustralien. Wenngleich Uran dort auch nur als Nebenprodukt aufscheint – in erster Linie wird Kupfer abgebaut – so gehört Olympic Dam trotzdem bereits zu den Minen mit der größten Uranproduktionskapazität. Die Lagerstätte stellt mit 2,1 Mio. t identifizierten Uranressourcen, die in einer durchschnittlichen Konzentration von 0,022 % im Erz vorliegen (davon 300 kt Uranreserven mit 0,05 %), die weltweit größte bekannte geologische Uranlagerstätte dar. Die Entdeckung von Olympic Dam im Jahr 1975 löste eine Explorationswelle nach vergleichbaren Lagerstätten aus. In der Folge wurde eine Reihe weiterer IOCG-Vorkommen mit erhöhten Urangelhalten identifiziert. Diese liegen zum Teil in der Umgebung von Olympic Dam (z. B. Manxman, Prominent Hill, Oak Dam East), aber auch in Nordaustralien (in der Mount-Isa-Region). Außerhalb von Australien wurden uraninitführende⁴ IOCG-Lagerstätten unter anderem in Brasilien entdeckt (Igarapé-Bahia, Salobo und Alemão). Viele, wenn nicht gar die meisten Lagerstätten, die dem IOCG-Typ zugeordnet werden, beinhalten keine nennenswerten Mengen an Uran und Olympic Dam bleibt bislang die herausragendste IOCG-Lagerstätte.⁵

2.1.2 Diskordanzgebundene Uranlagerstätten

Der bei Weitem wichtigste Typ hydrothermalen Uranvererzung ohne magmatische Beteiligung findet sich geologisch in der Nähe von Grenzflächen zwischen einem alten Grundgebirge und überlagernden Sandsteinen (Diskordanzflächen). Die Vererzung kommt dort zustande, wo uranhaltige Tiefenwässer durch hochporöses Sedimentgestein zirkulieren und mit organischem Material (z. B. abgestorbene Algen) in Kontakt kommen, das als Reaktionspartner dient, um Uran in schwerlösliche Formen umzuwandeln⁶.

Das beste Beispiel eines Sedimentationsbeckens, an dessen Basis nahe der Grenzfläche zum unterlagernden Grundgebirge hochgradige Uranlagerstätten entstanden sind, ist das Athabascabecken in Nordwestkanada. Dort findet man

4 Uraninit ist ein auch unter dem Namen Pechblende bekanntes Mineral.

5 Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Quellgesteine in Südaustralien, aus denen das Uran von den mineralisierenden Fluiden ausgelaugt wurde, von vornherein schon höhere Urankonzentrationen aufweisen als anderswo.

6 Verbindungen, die U in der Oxidationsstufe +VI enthalten, sind oft leicht wasserlöslich, während U(+IV) praktisch unlösliche Verbindungen bildet. Organische Verbindungen können U(+VI) zu U(+IV) reduzieren und damit immobilisieren.



ungewöhnlich hohe Urankonzentrationen im Bereich von einigen Prozent, die in keiner anderen Region weltweit vorhanden sind.

Die größte Uranmine McArthur River mit einer jährlichen Produktion von etwa 7000 t U, und die im Bau befindliche Mine Cigar Lake weisen sogar mehrere 10.000 t Erz mit Urangelhalten bis zu 20 % auf (Cameco 2013a).

Im Kanadischen Schild gibt es noch einige weitere Sedimentbecken, die dem Athabascabecken sowohl in ihrer Entstehungsgeschichte als auch dem Potenzial für Uranvererzungen ähnlich sind. Das wohl bedeutendste ist das Thelonbecken an der Grenze zwischen dem Nunavut- und den Nordwestterritorien. Herausragend unter den bekannten Uranvorkommen in diesem Becken sind die Kiggavik-Sissons-Lagerstätten, die 56 kt U bei einem Gehalt von 0,27 % U enthalten sollen (Areva 2006). Insgesamt liegen die wahrscheinlichen Uranressourcen im Thelonbecken jedoch mengenmäßig weit hinter jenen des Athabascabeckens.

2.1.3 An Sandstein gebundene (Rollfront-)Uranlagerstätten

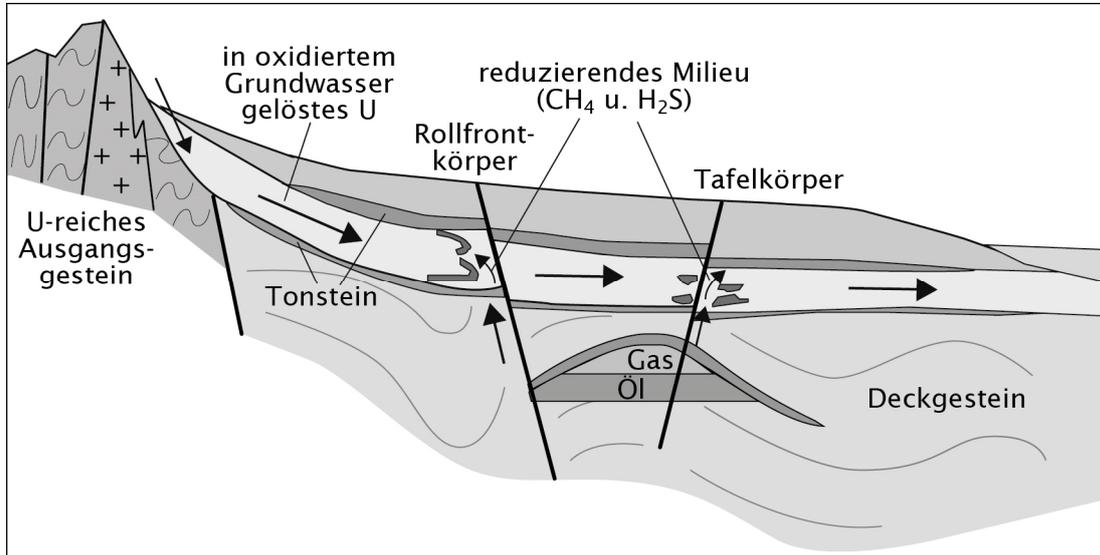
Dieser Lagerstättentyp weist viele Ähnlichkeiten zu den diskordanzgebundenen Uranlagerstätten auf. Ihm liegt der gleiche Bildungsprozess zugrunde. Im Gegensatz zu den beschriebenen Vererzungen besteht bei diesem Typ jedoch kein räumlicher Zusammenhang des Wirtsgesteins (Sandstein) zu Diskordanzflächen.

Die Reaktionszonen (Redoxfallen), die zur Ausfällung schwerlöslicher Uranverbindungen führen, liegen innerhalb des Sedimentverbands. Die Erzkörper nehmen die Form von Roll Fronts an oder sind schichtigtafelig ausgebildet. Roll Fronts weisen eine charakteristische Krümmung des Erzkörpers auf, die die unterschiedliche Grundwasserfließgeschwindigkeit inmitten und am Rande der wasserführenden Gesteinsschicht widerspiegeln. Die schichtigtafeligen Erzkörper bilden sich parallel zu einem Sedimentationstrend. Eine schematische Darstellung dieser Prozesse ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

Die meisten sandsteingebundenen Uranlagerstätten sind erstaunlich ähnlich, obwohl sie in Wirtsgesteinen höchst unterschiedlichen geologischen Alters und in verschiedensten Regionen auf beinahe jedem Kontinent zu finden sind. Die wichtige Voraussetzung für die Bildung dieses Vererzungstyps, die Präsenz einer Redoxfalle, ist maßgeblich von der Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff in den Sedimenten abhängig. Eine solche ist in nennenswertem Ausmaß erst seit dem Auftreten von Landpflanzen gegeben. Folglich ist es kaum erstaunlich, dass sandsteingebundene Uranlagerstätten im Lauf der Erdgeschichte im Wesentlichen erst ab dem Karbon (vor etwa 300 Mio. Jahren) von Bedeutung sind.

Die Urangelhalte der Erzkörper sind niedrig bis mittel (0,05 bis 0,4%), die einzelnen Erzkörper sind eher kleinräumig, können jedoch im Extremfall, wie in der Imouraren-Lagerstätte (Niger), gesamt mehr als 200 kt U enthalten (Areva 2013).

Abb. 2.1 Schematisches Profil durch ein kontinentales Becken mit Grundwasserstrom entlang eines topografischen Gradienten



Uran wird in oxidiertem Grundwasser gelöst und durch permeable Sandsteinschichten transportiert und fällt an kohlenwasserstoff- oder sulfidreichen Redoxfallen aus.

Quelle: nach Jaireth et al. 2008

Von großer ökonomischer Bedeutung sind die sandsteingebundenen Lagerstätten in Kasachstan. Sie sind die Grundlage, die Kasachstan zum heute größten Uranproduzenten der Welt mit einem Anteil von 36,5% der globalen Förderung im Jahr 2012 (WNA 2013j) machten. Diese Uranförderung stammt aus Sandsteinen in den Syrдыra- und Chu-Sarysu-Becken. Das Chu-Sarysu-Becken weist die größeren Lagerstätten auf. Die einzelnen Erzkörper erreichen 5 bis 25 m Mächtigkeit und erstrecken sich bis zu 800 m. Die Urangehalte sind sehr niedrig (0,03 bis 0,05%), die gesamten Ressourcen jedoch enorm. So werden für die beiden Becken zusammen Ressourcen von insgesamt 1,14 Mio. t U angenommen (Jaireth et al. 2008, bezugnehmend auf Daten von Hubbert 1999).

2.2 Abbaumethoden

Durch die geologischen Rahmenbedingungen reichert sich Uran in einer großen Bandbreite an Vererzungstypen und Konzentrationen im Umgebungsgestein an. Drei Abbaumethoden werden im Wesentlichen verwendet, um das Uran aus dem Wirtsgestein zu lösen: konventioneller Tagebau, Untertagebau und Auslaugungsverfahren (In-situ-Leaching). Die Entscheidung, welche Methode gewählt wird, basiert letztlich auf ökonomischen und ökologischen Überlegungen, wird aber in erster Linie von den geologischen Rahmenbedingungen



(Geometrie des Erzkörpers, Urangehalt im Erz, Lage des Erzkörpers etc.) vorgegeben.

2.2.1 Konventioneller Tagebau

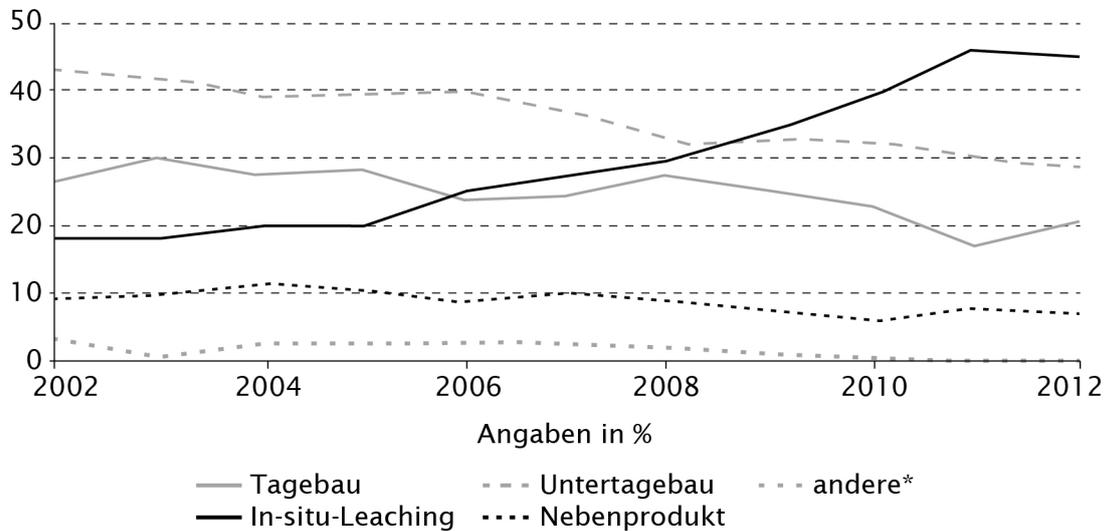
Wo Erzkörper nahe der Erdoberfläche liegen, werden diese üblicherweise im Tagebau abgebaut. Dabei fällt eine besonders große Menge an taubem Nebengestein an. Zum einen muss, je nach Tiefe des Erzkörpers, die Gesteinsüberlagerung entfernt werden. Zum anderen muss eine erhebliche Menge an Nebengestein um den Erzkörper herum abgebaut werden, um die Stabilität der Flanken der beim Tagebau entstehenden Grube zu gewährleisten. Der Abbau erfolgt über Bohrung, Sprengung und Abtransport des Erzes zur Aufbereitungsanlage bzw. des tauben Nebengesteins zur Aufhaldung mittels riesiger Muldenkipper. Dem Vorteil der relativ leichten Zugänglichkeit von der Oberfläche aus steht dabei der Nachteil des erhöhten Platzbedarfs für die Grube und die Abraumhalten gegenüber. 2012 wurden 20 % der abgebauten Uranerzmengen im Tagebau gefördert (Abb. 2.2), wobei eine deutlich fallende Tendenz über die letzten Jahre zu beobachten ist. Einige der weltweit größten Uranlagerstätten werden im Tagebau abgebaut. In fast allen Fällen des untertägigen Bergbaus geht der Phase des Untertagebaus eine Phase des Tagebaus voraus. So mancher Tagebau wird im Lauf der Zeit, sobald die Grube zu tief wird, als Untertagebau fortgesetzt.

2.2.2 Untertagebau

Wo Erzkörper tiefer liegen und somit darüber zu viel taubes Gestein abgetragen werden müsste, wird unter Tage abgebaut. Dies bedarf eines kostenintensiven Vortriebs von Schächten und Stollen, hat aber den Vorteil, dass weniger Nebengestein anfällt und der Eingriff in die Landschaft deutlich geringer ist. Ein Problem beim Untertagebau ist die gesundheitliche Gefährdung des arbeitenden Personals durch erhöhte Radioaktivität, die vom Erz und dem hohen Radongehalt in der Luft ausgeht. Dem kann zum Teil mit ferngesteuerten Abbautechniken begegnet werden. Diese Abbaumethode war früher dominant, 2012 wurden jedoch nur noch etwa 28 % der abgebauten Uranerzmengen unter Tage gefördert (Abb. 2.2). In China und Indien wird Uran in einer Vielzahl kleiner Minen unter Tage gewonnen. Große Produktionsstätten dieser Art finden sich in Australien, Kanada und Niger, einschließlich der Uranmine McArthur River (Kanada) mit der zurzeit weltweit größten Jahresproduktion.

Sowohl beim konventionellen Tagebau als auch beim Abbau unter Tage wird das geförderte Erz in einer Uranmühle weiterverarbeitet. Dabei wird das Erz zunächst grob zerkleinert und danach etwas feiner gemahlen. Anschließend wird mit einem chemischen Lösungsmittel das Uran aus dem Gestein gelöst (Ricciello et al. 1979) und letztendlich als Yellowcake ausgefällt.

Abb. 2.2 Entwicklung der Produktion nach Abbaumethode



* Keine Werte für andere Produktionsmethoden für 2011 und 2012. Diese können jedoch als vernachlässigbar betrachtet werden.

Eigene Darstellung mit Daten aus OECD-NEA/IAEA 2006b, 2008, 2010 u. 2012; Statista 2013; WNA 2013i

2.2.3 In-situ-Leaching

Ein Verfahren, das ohne den Abbau von Erz aus Lagerstätten auskommt, ist das In-situ-Leaching (ISL). Dabei wird das Uran durch Säuren (z. B. Schwefelsäure) oder Laugen (z. B. Natriumcarbonat) gelöst und dann an die Oberfläche befördert. Zur Mobilisierung des Urans wird das Lösungsmittel über hunderte Bohrlöcher in den vererzten Bereich unterhalb der grundwasserführenden Schichten eingebracht. Die uranhaltige Lösung wird an die Oberfläche gepumpt und daraus das Uran gewonnen.

Das zumeist verwendete Lösungsmittel ist Schwefelsäure. Die Menge an benötigtem Lösungsmittel schwankt je nach Lagerstätte. Die WNA (2013g) gibt Verbrauchszahlen zwischen 7,7 kg/kg U für die australische Beverley-Mine und etwa 40 kg/kg U für den kasachischen ISL-Prozess an. Allgemein gilt, dass ein Teil der insgesamt verwendeten Schwefelsäure zurückgewonnen und wieder verwendet werden kann (IAEA 2001b).

Voraussetzung für diese im Vergleich kostengünstige Methode ist eine entsprechend hohe Durchlässigkeit des Erzkörpers, wie etwa bei sandsteingebundenen Vererzungen, sowie die Abdichtung des Erzkörpers durch umgebende, impermeable, meist tonige Schichten. Weiterhin soll der Erzkörper möglichst nicht von tektonischen Störungen durchzogen sein, um ein Entweichen der Laugungslösung an die Oberfläche zu minimieren.



Der Vorteil der Methode liegt in der Vermeidung großer Abraumhalden und damit einhergehend sehr niedriger Transportkosten. Dank der insgesamt deutlich niedrigeren Abbaukosten wird die Methode vor allem beim Abbau niedriggradiger Erzkörper eingesetzt. Ein Nachteil liegt in einem, je nach geologischen Umständen unterschiedlich ausgeprägtem Risiko für die Umgebung durch Kontamination von Grundwasser und Erdoberfläche mit uranreichen Lösungen. Der Anteil des jährlich durch ISL gewonnenen natürlichen Urans hat sich in den letzten Jahren sukzessive von 20 % auf 45 % gesteigert (Abb. 2.2), hauptsächlich wegen des vermehrten Einsatzes der Methode in Kasachstan und Usbekistan.

Andere Auslaugungsverfahren werden zum Teil unter Tage direkt an der Stollenfront angewandt, was jedoch mengenmäßig nur einen verschwindend kleinen Prozentsatz ($<0,1\%$) ausmacht, oder es werden Teile des aufgehaldeten Materials direkt vor Ort gelaugt. Letztere Methode wird typischerweise als zusätzliche Urangewinnungsmethode beim normalen Tagebau angewandt und trug 2010 insgesamt 1,9 % zur gesamten Uranförderung bei (OECD-NEA/IAEA 2010).

2.2.4 Uran als Nebenprodukt

Urangewinnung als Nebenprodukt findet unter Tage oder im Tagebau statt, wenn gleichzeitig ein weiteres Mineral abgebaut wird. Dort, wo Uran als Nebenprodukt gewonnen wird, richtet sich die Abbaumethode zwangsläufig nach dem Hauptprodukt. Die wohl relevanteste Lagerstätte hierbei ist Olympic Dam in Südastralien (Kap. 3.1.4.1). Dort wird Kupfer als Hauptprodukt gewonnen, Uran und Gold sind wesentliche Nebenprodukte. Ein anderes Beispiel, wo Uran als Nebenprodukt gewonnen wird, ist der Goldbergbau. So wurden z. B. in Südafrika seit 1952 insgesamt 150 kt U gefördert, der größte Teil davon als Nebenprodukt aus dem Goldbergbau.

2.2.5 Mikrobenunterstützte Urangewinnung

Nachdem Mikroorganismen noch in den 1980er Jahren als ein störender Faktor beim Uranabbau mittels ISL beurteilt worden waren (Yates et al. 1983), konnte in einer Reihe von Studien bereits gezeigt werden, wie Algen/Mikroben zur Entfernung von Uran aus Haldenabwässern ehemaliger Uranbergbaustätten eingesetzt werden könnten (Brierley 1982; Geißler 2007; Kalin et al. 2005). Theoretisch sollte es auch möglich sein, Mikroorganismen zur Urankonzentration aus niedriggradigem, möglichst lockerem Gestein einzusetzen.

Vergleichbare Verfahren der bakterienunterstützten Gewinnung von Metallen aus niedriggradigem Erz werden bereits z. B. bei Kupfer und Gold angewandt. Beispielsweise wird gut ein Viertel des weltweit bergbaulich gewonnenen Kupfers mit biotechnischen Verfahren produziert. Auch bei der Gewinnung



von Gold, insbesondere aus alten Halden, haben sich biotechnologische Verfahren mittlerweile etabliert. Dabei werden eisen- und schwefeloxidierende Mikroorganismen eingesetzt, um das in sulfidischen Mineralen gebundene Kupfer oder Gold freizusetzen. Die hierfür typischerweise eingesetzten Mikroorganismen sind gemischte Kulturen der Art *Thiobacillus* und *Leptospirillum ferrooxidans*. Die derzeit studierte mikrobenunterstützte Urangewinnung bedarf der Erfüllung zweier Voraussetzungen:

- › das Uranerz muss reich an Pyrit (Eisensulfid) und arm an Mineralen sein, die Säuren neutralisieren können (z. B. Karbonate), um den pH-Wert niedrig zu halten:⁷
- › das Uranerz muss locker sein, um einen leichten Zugang zu den Mineral-kornoberflächen wie beim ISL zu ermöglichen.

Niedriggradige Uranvorkommen, die sich am ehesten für eine solche Gewinnung eignen könnten, wären die alten Halden aus dem südafrikanischen Goldbergbau. Sie erfüllen beide der zuvor genannten Kriterien. Schwarzschiefergebundene Uranvorkommen (Kap. 2.3.2) beinhalten auch Pyrit, sind aber feste, relativ impermeable Gesteine. Sie müssten vor dem Einsatz einer mikrobenunterstützten Urangewinnung erst mechanisch aufgelockert werden, was wiederum einen hohen Energieeinsatz impliziert.

2.3 Unkonventionelle Ressourcen

Wie bei anderen Rohstoffen unterscheidet man auch bei der Urangewinnung zwischen konventionellen und unkonventionellen Vorkommen. Bei konventionellen Ressourcen kann Uran als Hauptprodukt oder wichtiges Nebenprodukt gewonnen werden, während Uran in unkonventionellen Ressourcen nur als untergeordnetes Nebenprodukt oder aus sehr niedriggradigen Mineralisationen gewonnen werden kann.

Im Folgenden werden niedriggradige unkonventionelle Uranvorkommen erörtert, die in globalen Ressourcenanalysen meist nicht berücksichtigt werden.

2.3.1 Uran aus Phosphatlagerstätten

Die ergiebigsten unkonventionellen Ressourcen werden heute mit Uran in phosphathaltigem Gestein assoziiert. Die Uranextraktion ist ein Nebenprodukt der Gewinnung von Phosphat, das vorwiegend zur Düngemittelproduktion eingesetzt wird. Für diesen Bedarf reichen die bekannten Phosphatlagerstätten noch viele Jahrhunderte aus. Aus 1 t geschürften Gesteins können bei einem

⁷ Dieser stark saure Bereich schafft ein passendes Lebensmilieu für die Mikroorganismen, die ihre Lebensenergie aus der Oxidation von Schwefel oder Fe²⁺-Salzen gewinnen.



mittleren Gehalt von 150 ppm (0,015%)⁸ und einer gesamten Effizienz von 70% nur 38 g U gewonnen werden.

Die größten Uranmengen werden in den marinen Phosphatlagerstätten in Marokko mit insgesamt 6.526 kt U vermutet, bei geschätzten 70 bis 230 ppm, die lokal auch bis zu 600 ppm betragen können. Weitere Lagerstätten befinden sich in Jordanien mit 100 bis 124 kt U, Ägypten 35 bis 100 kt U, Mexiko 100 bis 151 kt U und in weiteren Ländern (OECD-NEA/IAEA 2010). Globale Schätzungen gehen von bis zu 22.000 kt U aus. Deffeyes und MacGregor (1980) schätzten den durchschnittlichen Urangehalt von solchen Lagerstätten mit nur etwa 10 bis 30 ppm ab.

Historisch gesehen sind Phosphatlagerstätten die einzigen unkonventionellen Ressourcen, aus denen signifikante Mengen an Uran gewonnen wurden (OECD-NEA/IAEA 2010). Aus den marokkanischen Phosphatlagerstätten wurden 690 t U zwischen 1975 und 1999 gefördert, aus den Phosphoritlagerstätten in Florida, USA, immerhin 17.150 t U zwischen 1954 und 1962. Kasachstan förderte insgesamt ca. 40.000 t U aus Phosphoritlagerstätten. Mit dem Verfall des Uranpreises in den 1990iger Jahren wurden allerdings alle Betriebe zur Urangewinnung aus Phosphatlagerstätten eingestellt.

Die derzeit maximal für möglich gehaltene Produktion von Uran aus der Phosphatgewinnung ist sowohl vom angenommenen Phosphatbedarf zur Düngemittelherstellung als auch vom jeweiligen Uranpreis abhängig. IAEA (1989) gingen bei einer ersten Schätzung der theoretisch möglichen Produktionskapazität von den etwa 400 Anlagen aus, in denen hypothetisch bis zu 13 kt U pro Jahr abgetrennt werden könnten. Mehr Phosphat zu produzieren als für die Landwirtschaft benötigt wird, nur um Uran zu gewinnen, ist aber weder rein ökonomisch noch ressourcenökonomisch sinnvoll. (IAEA 2001a) ging daher bei realistischer Einschätzung von einem Bedarf von 66 Mt Phosphatkonzentrat pro Jahr aus, wodurch maximal etwa 3,7 kt U pro Jahr gewonnen werden könnten⁹. Brasilien ist derzeit der größte Phosphatproduzent. Die Uranproduktion aus Phosphat ist dort in Santa Quitéria in Planung und soll bei voller Auslastung der Anlagen 1,6 kt U pro Jahr betragen. Im September 2013 wurde ein entsprechendes Verfahren zur Umweltverträglichkeitsprüfung begonnen (WISE 2013b).

Ungeachtet bestehender Probleme bei der Urangewinnung (und anderer Metalle) aus Phosphat könnte dieser Vererzungstyp langfristig einen gewissen Beitrag zur globalen Uranversorgung leisten, wenn der Uranpreis deutlich ansteigt.

8 Der Phosphoranteil in typischen Lagerstätten liegt im Vergleich dazu im einstelligen bis niedrigen zweistelligen Prozentbereich.

9 Eine solche Uranabtrennung als Nebenprodukt der Phosphatgewinnung könnte sogar als umwelt- und gesundheitspolitisch sinnvoll gelten, da damit vermieden würde, Uranspuren als Teil des Düngers auf die Äcker zu bringen.

2.3.2 Uran aus Schiefer

Schwarzschiefergesteine¹⁰ können, bedingt durch ihre häufig große räumliche Ausdehnung, riesige Uranressourcen beinhalten, doch der Urangehalt liegt in fast allen Fällen mit Werten zwischen 50 und 250 ppm unterhalb der Rentabilitätsgrenze¹¹. Aus deutscher Sicht erwähnenswert ist, dass ein wichtiger Teil der früheren ostdeutschen Uranproduktion aus Schwarzschiefern im Revier von Ronneburg kam. Ähnliche Schwarzschiefer sind aus Schweden bekannt (Randstad-Vorkommen). Darin verbergen sich geschätzte 250 kt U, aber bei einem Urangehalt von durchschnittlich nur 200 bis 300 ppm (IAEA 2009). Vergleichbare Schwarzschiefer finden sich auch entlang der Yangtze Plattform in Süchina.

Erste Konzepte zum eventuellen Abbau tonschiefergebundener Uranvorkommen liegen aus Südafrika (73 kt U), Südkorea (14 kt U) und Spanien (13,5 kt U) vor. Ein Abbau dieser Vorkommen, an erster Stelle Springbok Flats (Südafrika), wäre jedoch mit enormen Kosten verbunden, sowohl in Bezug auf Abbaukosten als auch auf Umweltverträglichkeit, und ist noch weit von einer Rentabilitätsgrenze entfernt. Das größte Potenzial von tonschiefergebundenen Uranvererzungen scheint in der Viken-Lagerstätte (Schweden) zu liegen, für die Puritch et al. (2014) immerhin eine vermutete Uranressource von 440 kt feststellen konnten.

2.3.3 Uranhaltige Kohle und Lignit

Erhöhte Urankonzentrationen können in Kohle und Lignit¹² sowie in unmittelbar benachbarten Sedimentgesteinen auftreten. Die Urangehalte sind jedoch typischerweise mit 20 bis 60 ppm unwirtschaftlich, können lokal aber bis zu einige Prozent erreichen. Beispiele solcher Vorkommen sind das Serresbecken in Griechenland, Vorkommen in Nord- und Süddakota in den USA, die Koldjat- und Nizhne-Iliyskoe-Lagerstätten sowie Melovoe in Kasachstan und Freital in Deutschland.

10 Schwarzschiefer sind tonige Sedimentgesteine marinen Ursprungs, die sich entlang von Schichtflächen leicht spalten lassen.

11 Es ist auf jeden Fall anzunehmen, dass für den Abbau und die Verarbeitung von Uran aus unkonventionellen Ressourcen keine marktüblichen Prozesse eingesetzt werden und entsprechende Verarbeitungsschritte erst entwickelt werden müssen. Bei derart geringen Urangehalten ist das Interesse zur Erschließung solcher Lagerstätten dementsprechend gering.

12 Lignit ist nicht vollständig inkohltes Pflanzenmaterial, d. h. eine Vorstufe zu Braunkohle.



2.3.4 Uran aus Meerwasser

Allein durch die enorme Menge an Meerwasser stellen die Ozeane riesige hypothetische Ressourcen für eine ganze Reihe von Metallen dar, die darin aber natürlich nur in sehr geringen Konzentrationen gelöst sind. Bei einem Urangehalt von 0,003 bis 0,004 ppm enthalten die Weltozeane rund 4 Mrd. t U. Aus der sehr geringen Urankonzentration ergibt sich die Notwendigkeit, riesige Wassermengen zu behandeln¹³ (MacFarlane/Miller 2007). Beispielsweise müsste bei einer realistischen Extraktionseffizienz von 1 % ein Ozeanstrom in der Größenordnung des 700-fachen jährlichen Durchflusses des Mississippi verarbeitet werden, um 10 kt U zu erhalten – dem jährlichen Bedarf von etwa 50 Kernreaktoren.

Die Gewinnbarkeit dieses Urans war über Jahrzehnte hinweg Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte in Deutschland, Großbritannien, Italien, Japan und den USA (Nobukawa et al. 1994; Schwochau 1979; Sugo 2005; Tabushi et al. 1979; Yue et al. 2013). Das Uran wird dabei durch ein uranabsorbierendes organisches Material aus dem Meerwasser abgetrennt. Da die Absorption bei höherer Temperatur besser funktioniert, kommen vor allem Standorte mit warmen Strömungen infrage, etwa am Golfstrom oder an der Kuroshio (schwarze Strömung) vor Japan.

Nur noch eine Arbeitsgruppe in Japan war mit dieser Thematik beschäftigt. In Tamada (2009) wurden die letzten Ergebnisse zusammengefasst und das Fazit gezogen, dass die Förderung von Uran aus Meerwasser zu Kosten bis hinunter zu 250 US-Dollar/kg realisierbar wäre. Allerdings sind derartige Abschätzungen immer mit hohen Unsicherheiten verbunden, unter anderem weil technische Schwierigkeiten beim Upscaling zu großindustriellem Einsatz bzw. Langzeiteinsatz unter Praxisbedingungen nur schwer vorherzusehen und noch schwerer zu beziffern sind. Hauptsächlich Grund für niedrigere Kostenabschätzungen – im Vergleich zu früheren Abschätzungen – ist in der technischen Fortentwicklung zu sehen. Konkret in der Verwendung von bis zu 60 m langen 2 cm dicken porösen Polypropylenträgerseilen, die im Wasser schwimmen und um die die uranabsorbierenden Polymere geflochten werden, sodass ein Geflecht von etwa 10 cm Dicke entsteht. Diese Braids werden am Meeresboden verankert und schweben in der Meeresströmung. Die Forscher glauben so, im Vergleich zu früheren Methoden, bis zu 40 % der Kosten einsparen zu können. Für eine fundierte Einschätzung, ob bzw. wie die Prozessschritte der Urangewinnung aus Meerwasser (Herstellung der absorbierenden Polymere, deren Ausbringung auf See und der Extraktion des absorbierten Urans) so weit entwickelt werden können, dass die Gesamtenergiebilanz positiv wird, d.h. mehr Energie bei der Nutzung als Kernbrennstoff gewonnen werden kann, als in den übrigen Schritten verbraucht wird, ist der momentane Kenntnisstand bei Wei-

¹³ In etwa 300.000 m³ Meerwasser ist nur etwa 1 kg U enthalten.



tem noch nicht ausreichend. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Dies gilt auch für Kostenabschätzungen.

Die mögliche Nutzung von Meerwasseruran wird voraussichtlich erst dann ernsthafter verfolgt, wenn sehr hohe Uranpreise erwartet werden, selbst wenn alle technischen Unklarheiten und Probleme beseitigt werden sollten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass unkonventionelle Uranressourcen gegenwärtig keine Rolle auf dem Uranmarkt spielen und dies in absehbarer Zeit so bleiben wird. Kleinere Beiträge – beispielsweise als Nebenprodukt zur Phosphatgewinnung – sind aber zukünftig denkbar.

2.4 Historische Entwicklung und aktueller Status der Uranversorgung

Die jährliche globale Uranförderung hat in ihrer knapp 70-jährigen Geschichte zwei deutliche Maxima erlebt. Das erste Maximum mit etwa 50.000 t U spiegelte 1959 den Höhepunkt der nuklearen Aufrüstung wider. Das zweite mit 70.000 t U war 1980 Folge der globalen Wachstumserwartung für die Kernenergie zu jener Zeit (Abb. 2.3). Insbesondere in den 1970er und 1980er Jahren lag demzufolge die Menge an jährlich produziertem Uran über dem jeweiligen zivilen Bedarf. Danach kehrte sich das Bild um und die Uranproduktion blieb hinter dem Bedarf zurück. Es gab ein Uranüberangebot, das zu einem sinkenden Uranpreis und damit zu sinkenden Produktionszahlen führte, sodass 1999 nur noch die Hälfte des Bedarfs aus der direkten Produktion gedeckt wurden. Der Rest wird seither aus Lagerbeständen, die infolge der Überproduktion entstanden waren, und aus Beständen, die durch Uranrückgewinnung aus abgerüsteten Kernsprengköpfen gewonnen wurden, gedeckt (Kap. 2.2). Obwohl diese Lücke noch heute existiert, wurde sie sukzessive verkleinert und betrug 2012 nur noch 16% des Bedarfs.

Von 2008 bis 2012 konnte die gesamte Weltproduktion um etwa ein Drittel gesteigert werden. Hauptverantwortlich dafür ist Kasachstan, das seine Produktion von 2000 bis 2010 verzehnfachte und heute mit mehr als einem Drittel (2012: 21.300 t U) der Gesamtproduktion Weltmarktführer ist. Es scheint jedoch, dass sich das Land dem Ende seiner intensiven Ausbauphase nähert, da mittlerweile die Wachstumszahlen rückläufig sind (Abb. 2.3). Ansonsten verzeichnen Namibia, Niger, die USA und Usbekistan seit 2003 wesentliche Steigerungen des nationalen Outputs,¹⁴ zusammen beträgt diese Erhöhung über 10 Jahre aber nur so viel wie in Kasachstan innerhalb seines erfolgreichsten Ausbaujahres (2008 auf 2009). Seit 2009 wird auch in Malawi Uran abgebaut und das Land befindet sich bereits unter den zehn größten Produzenten. Auffallend ist die Stagnation der Produktionsentwicklung in Australien und Kanada. Wäh-

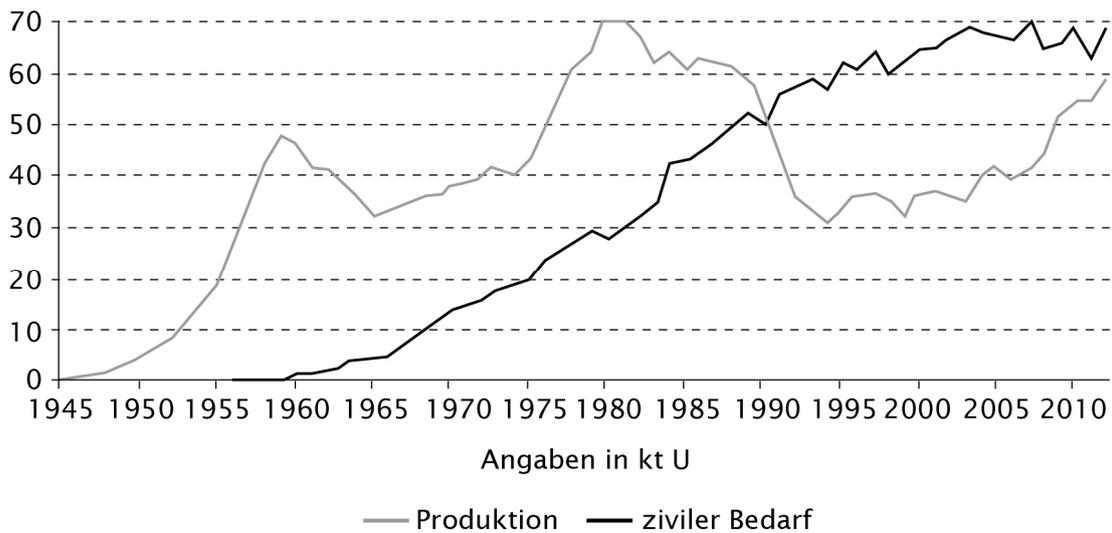
¹⁴ China wird an dieser Stelle aufgrund der unsicheren Datenlage ausgespart (Kap. 3.1.3.3.)

2.4 Historische Entwicklung und aktueller Status der Uranversorgung



rend 2003 die Uranproduktion dieser beiden Länder zusammen 50,4% der Weltproduktion betrug, lieferten diese 2012 nur noch 15% (9.000 t U) bzw. 12% (7.000 t U) des global produzierten Urans.

Abb. 2.3 Historische Uranproduktion und ziviler Bedarf für Leistungsreaktoren

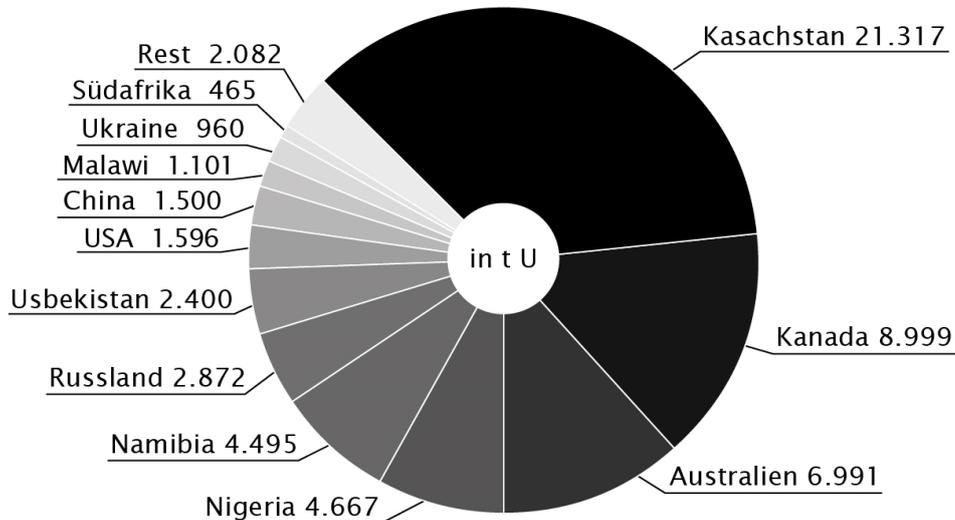


Eigene Darstellung mit Daten aus OECD-NEA/IAEA 2006a, 2008, 2010 u. 2012; WNA 2013j

Die aktuell größten Uranproduzenten sind quasi identisch mit den Ländern mit den größten Uranvorkommen (Abb. 2.4 u. Tab. 3.1) Ausnahmen sind hier Brasilien, das große Ressourcen, aber eine geringe Produktion hat, und Malawi, das eine vergleichsweise hohe Produktion bei eher geringen Ressourcen hat. Dies mag ein Hinweis darauf sein, dass, nachdem der Uranabbau in elf Ländern bereits eingestellt wurde (Zittel/Schindler 2006, S. 10), die Uranschürfung genau in den Ländern erfolgt, wo noch größere Reserven vorhanden sind und Ressourcen vermutet werden.

Ein detaillierter Blick auf die Produzentenländer zeigt, dass diese ganz andere sind als die Konsumenten. Nur Kanada und Südafrika sind derzeit in der Lage, ihren Eigenbedarf an Uran zu decken. Russland kann sich zumindest rein rechnerisch zu etwa 80% selbst versorgen. Alle anderen Länder mit Kernenergieprogrammen, wie Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Japan, Schweden, Spanien, Südkorea, Ukraine, USA, sind weitgehend oder vollständig von Uranimporten abhängig. Insbesondere die europäischen Länder sind fast vollständig auf Importe angewiesen.

Abb. 2.4 Uranproduktion nach Ländern 2012



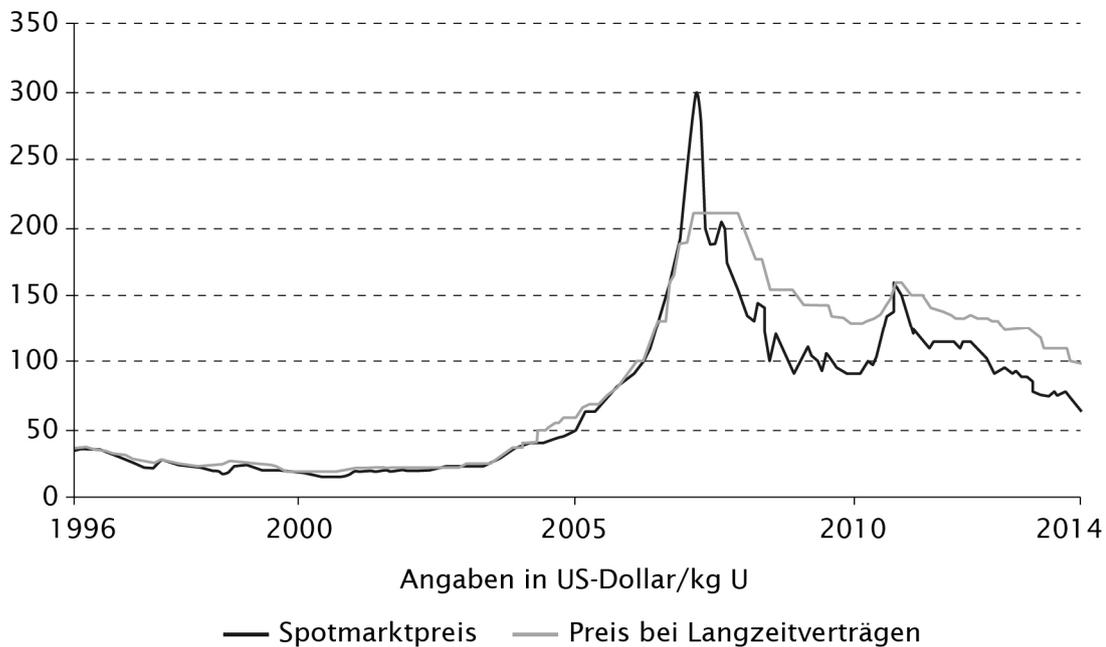
Quelle: nach WNA 2013j

Die Entwicklung von neuen Kapazitäten zur Uranförderung ist an den Bedarf und den resultierenden Uranpreis gekoppelt. Dieser ergibt sich aus dem Handel zwischen Produzenten und Reaktorbetreibern. Gängige Praxis sind dabei Long-term Contracts, in denen eine Abnahme des Urans über mehrere Jahre zugesichert und Lieferungen zu einem fixierten Preis garantiert werden. Diese Verträge sind zwar nicht öffentlich zugänglich, jedoch erhebt z. B. die ESA (2013) jährlich Durchschnittskosten der europäischen Reaktorbetreiber. Was direkt verfolgt werden kann, ist die Entwicklung des Spotmarktpreises. Dieser bezieht sich auf Einzellieferungen oder Verträge, die weniger als ein Jahr laufen. Laut ESA (2013) betrifft dies in Europa nur etwa 5 % des Handelsvolumens. Eine globale Erfassung dazu gibt es nicht, es wird jedoch vermutet, dass nur 10 bis 15 % des weltweiten Uranhandels über den Spotmarkt laufen.

In den letzten 10 Jahren hat der Spotmarktpreis eine ungewöhnliche Entwicklung vollzogen. Von ca. 25 US-Dollar/kg U stieg der Preis in nur 5 Jahren auf rund 300 US-Dollar/kg U im Jahr 2007 (Abb. 2.5). Als Gründe dafür werden Marktspekulationen einhergehend mit den Erwartungen einer nuklearen Renaissance sowie die verzögerte Inbetriebnahme der kanadischen Mine Cigar Lake gesehen. Dem folgte ein fast ebenso schneller Preisrückgang, danach ein erneuter rascher Anstieg ab Mitte 2010, der dann von den Unfällen in Fukushima gestoppt wurde. Seitdem sind die Preise rückläufig. Ende 2013 lag der Preis bei rund 80 US-Dollar/kg U. Hier spielte das Wegfallen von mehr als 50 japanischen und 8 deutschen Reaktoren als Abnehmer eine Rolle, was zu einer Überversorgung des Marktes führte.



Abb. 2.5 Entwicklung des Uranpreises



1 lb entspricht $\approx 0,454$ kg.

Eigene Darstellung nach Cameco 2014c

Insgesamt folgten dem generellen Anstieg des Preises ab 2003 erhöhte Aktivitäten in der Exploration und der Mienenentwicklung. Der derzeitige niedrige Uranpreis wirkt sich jedoch auf viele Mienenprojekte nachteilig aus, da diese sich mitten in einer langen Entwicklungsphase befanden und aus wirtschaftlichen Überlegungen bis auf Weiteres zurückgestellt werden mussten. Dies betrifft im Speziellen Projekte in Kanada, Namibia sowie Russland. Aber auch bereits in Betrieb befindliche Mienen sind betroffen, die sich zusätzlich mit steigenden Produktionskosten konfrontiert sehen, sodass weltweit derzeit rund die Hälfte der existierenden Mienen zu Kosten über dem Spotmarktpreis produziert (Chang 2013).

Letztendlich hatten die Unfälle in Fukushima auch einen Einfluss auf andere Teile des nuklearen Brennstoffkreislaufs. Durch den verringerten Bedarf ist auch eine geringere Nachfrage nach Anreicherungsanlagen zu verzeichnen. In den Anreicherungsanlagen wird daher bis zu einem Tailsgehalt – also jenem Anteil an U-235, der als Abfall zurückbleibt – von nun mehr 0,25% U-235 statt 0,3% U-235 angereichert, um die Anlagen optimaler auszulasten. Gleichzeitig wird das Uran so besser ausgenutzt. Dies ist insofern von Interesse, da bei Fortsetzung dieses Trends ein um ein paar Prozent geringerer jährlicher Natururanbedarf zu erwarten ist.



3 Reserven und Ressourcen

Ganz generell sind die heutigen Kenntnisse und Bewertungen der globalen Situation bei den Ressourcen die Basis für eine Abschätzung der zukünftigen Verfügbarkeit von Rohstoffen. Im Falle von Uran gibt es dabei die Besonderheit der Unterscheidung zwischen primären und sekundären Ressourcen, auf die getrennt voneinander eingegangen werden soll. Primäre Ressourcen sind solche, die direkt aus dem Bergbau stammen. Als sekundäre Ressourcen versteht man solche, die unter Umständen schon weit in der Vergangenheit (z.B. in Zeiten der Überproduktion der 1970er und 1980er Jahre; Abb. 2.3) abgebaut wurden und jetzt erst für die Verwendung in Reaktoren herangezogen werden. Im Detail versteht man unter sekundären Ressourcen

- > Lagerbestände größeren Umfangs,
- > hochangereichertes Uran aus Waffen, das wieder abgereichert wird,
- > Uran aus wiederaufbereitetem Brennstoff,
- > abgereichertes Uran, das z.B. aufgrund freier Kapazitäten und günstiger Marktlage nochmals (bzw. weiter) angereichert wird,
- > Uran aus Abraumhalden vergangener Bergbauaktivitäten und
- > die Einsparung von Uran durch den Einsatz plutoniumhaltiger Brennstoffe (MOX).

Für eine globale Bestandsaufnahme der Ressourcen, Kapazitäten und Verfügbarkeiten von Uran wird vielfach auf die Angaben der Red Books der OECD-NEA/IAEA zurückgegriffen. Zusätzlich wird im Folgenden die Ressourcenevaluierung aus dem zugrundeliegenden Gutachten von Frimmel (2010) erläutert. Diese erweitert die Erhebung der OECD-NEA/IAEA durch eine Analyse alternativer Quellen und die Darstellung möglicher zukünftiger Projekte mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit der Umsetzung.

3.1 Primäre Ressourcen

3.1.1 Definitionen

Beschreibung und Erfassung von Ressourcen haben sich ursprünglich in den meisten Ländern unabhängig voneinander entwickelt. Dementsprechend verschieden sind Bezeichnungen und Definitionen. Um eine einigermaßen einheitliche Erfassung zu ermöglichen, wird von der OECD-NEA/IAEA (2012, S. 462) eine Klassifizierung verwendet, die eine Zuordnung der nationalen Angaben ermöglichen soll und sich auch auf dem internationalen Markt großteils durchgesetzt hat. Diese wird im Folgenden beschrieben und auch im gesamten weiteren Diskussionspapier verwendet (Abb. 3.1).

Abb. 3.1 Uranvorkommen und Einteilung in Ressourcenkategorien

weltweite Uranvorkommen			
identifizierte Ressourcen		unentdeckte Ressourcen	
verhältnismäßig gesicherte Ressourcen		vermutete Ressourcen	prognostizierte Ressourcen
gemessene Ressourcen	angegebene Ressourcen		
nachgewiesene Reserven	wahrscheinliche Reserven	spekulative Ressourcen	

Quelle: nach IANUS 2011

Generell gilt, dass der Grad der Gewissheit des Vorhandenseins von Ressourcen einen wesentlichen Einfluss auf die Klassifizierung hat. Als erste grobe Unterscheidung wird bei den konventionellen Uranressourcen daher zwischen identifizierten Ressourcen und unentdeckten Ressourcen unterschieden.

Identifizierte Ressourcen (Identified Resources), unterteilt in verhältnismäßig gesicherte Ressourcen (RAR) und vermutete Ressourcen (IR), befinden sich in Uranlagerstätten, die durch als ausreichend betrachtete direkte Messungen beschreibbar sind, sodass Vorstufen zu Machbarkeitsstudien oder manchmal bereits Machbarkeitsstudien durchführbar sind.

- > RAR bezieht sich auf Uran, das in bekannten Lagerstätten mit gesicherten Kenntnissen über Größe, Urangehalt und Konfiguration vorkommt, sodass Mengenangaben gemacht werden können über Abbaubarkeit durch bekannte Technologie innerhalb definierter Kostenbereiche. Ihre Existenz gilt als gesichert. In Firmenberichten und in einigen Länderreports werden auch die Begriffe Measured Resources und Indicated Resources verwendet, die zusammengenommen der RAR-Kategorie entsprechen.
 - Bei gemessenen Ressourcen (Measured Resources) ist die Menge, der Urangehalt und weitere physikalische Größen so weit bekannt, dass gut eingeschätzt werden kann, wie die Planung der Produktion vorbereitet und deren ökonomische Realisierbarkeit bewertet werden kann. Sehr detaillierte Explorations- und Probeentnahmedaten sind dazu die Basis.
 - Für angegebene Ressourcen (Indicated Resources) gilt in etwa dasselbe, allerdings steht hier zunächst die Planung der Mine im Vordergrund, mit entsprechend etwas reduzierten Anforderungen an die Datenbasis.
- > IR sind Ressourcen, deren Existenz auf Basis direkter geologischer Evidenz oder der möglichen Erweiterung gut explorierter Lagerstätten gefolgert wird. Es sind Ressourcen, bei denen die Datenbasis nicht ausreicht, um eine Klassifizierung als RAR vorzunehmen. IR sind nicht so zuverlässig definiert und im Allgemeinen werden weitere direkte Messungen benötigt, bevor



Entscheidungen über Vorbereitungen zu einem denkbaren Abbau getroffen werden.

Unentdeckte Ressourcen (Undiscovered Resources), unterteilt in prognostizierte Ressourcen (Prognosticated Resources) und spekulative Ressourcen (Speculative Resources), schließen Uranlagerstätten ein, von denen erwartet wird, dass sie vorkommen. Diese Erwartung basiert auf geologischem Kenntnisstand über früher entdeckte Lagerstätten und regionalen geologischen Kartierungen. Ein erheblicher Aufwand an weiterer Explorationsarbeit ist notwendig, bevor ihre Existenz als gesichert angenommen werden kann und Urangehalte sowie Mengenangaben gut definierbar sind.

Ressourcen beschreiben insgesamt schon Uranmengen, für die ein generelles ökonomisches Interesse existieren muss. Darüber hinaus gehend ist die Klassifizierung als Reserve. Hier muss neben dem generellen Interesse auch schon die ökonomische Machbarkeit des Abbaus demonstriert worden sein. Die Mengen, die als Reserven definiert werden, hängen dabei auch immer eng mit der wirtschaftlichen Lage und dem erzielbaren Uranpreis zusammen. Ist dieser beispielsweise zu niedrig, sind manche Vorkommen (oder Teile eines Vorkommens) zwar noch immer interessant, aber eben nicht mehr ökonomisch abbaubar. Die Angaben an Reserven sind daher eigentlich bedeutsamer für eine Einschätzung der möglichen Zurverfügungstellung von Uran innerhalb der näheren Zukunft. Leider liegen dazu keine globalen Daten vor. Grob umrissen stellen die Reserven eine Teilmenge der RAR dar. In die definierten Mengen an Reserven geht ein möglicher Verlust beim Abbau schon ein. Auch die Reserven lassen sich in die zwei Unterkategorien nachgewiesene Reserven (Proven Reserves) und wahrscheinliche Reserven (Probable Reserves) unterteilen.

Neben der geologischen Sicherheit von Vorkommen sind auch die Kosten, zu welchen das Uran förderbar ist, ein wesentlicher Aspekt bei der Einteilung der Reserven und Ressourcen. Üblicherweise wird dabei auch nach der Klassifizierung der OECD-NEA/IAEA vorgegangen. Diese teilen die Ressourcen in folgende Kostenkategorien ein:

- > Uran förderbar zu weniger als 40 US-Dollar/kg U
- > Uran förderbar zu weniger als 80 US-Dollar/kg U
- > Uran förderbar zu weniger als 130 US-Dollar/kg U)
- > Uran förderbar zu weniger als 260 US-Dollar/kg U)

Die teuerste Kategorie (< 260 US-Dollar/kg U) wurde aufgrund des nachlassenden Interesses an Neuerschließungen ab den 1980er Jahren nicht mehr benutzt, jedoch mit dem Red Book 2009 (OECD-NEA/IAEA 2010) wieder eingeführt. Dies spiegelt eine Verlagerung der Ressourcen zu höheren Kostenkategorien wider (Details Kap. 3.1.2.2 u. Abb. 3.2).

Als Basis für die zukünftige Uranversorgung werden im Allgemeinen, auch von der OECD-NEA/IAEA, die identifizierten Ressourcen herangezogen. Be-



sonders relevant für die nähere Zukunft der möglichen Urangewinnung ist die RAR-Kategorie. Die niedrigen Kostenkategorien beschreiben weitgehend die Mengen, die als gesichert abbaubar gelten und die für die gegenwärtigen Produktionsszenarien der Minenbetreiber die höchste Relevanz haben.

Insgesamt berücksichtigen die gängigen Uranklassifizierungen also momentan nur Produktionskosten und Uranmengen, nicht aber die spezifischen Energieaufwendungen bzw. den Wasserverbrauch für die Uranproduktion, die für deren Energie- und Umweltbilanz eine entscheidende Rolle spielen (Kap. 4.3).

3.1.2 Ressourcenüberblick

3.1.2.1 Aktueller Stand der Ressourcen

Verhältnismäßig gesicherte Ressourcen

Mitte 2012 wurde die aktuelle Ausgabe des Red Book 2011 der OECD-NEA/IAEA (2012) veröffentlicht. Das Referenzdatum für die Ressourcenerhebung in den verschiedenen Mitgliedsländern war dabei der 1. Januar 2011. Zu diesem Datum wurden etwa 4.400 kt U als verhältnismäßig gesichert (RAR) und zu Kosten von weniger als 260 US-Dollar/kg U abbaubar ausgewiesen.

Der Großteil dieser Ressourcen verteilt sich weltweit auf wenige Regionen; mehr als 90 % befinden sich in nur elf Ländern. Über 27 % (rund 1.200 kt U) liegen in Australien, davon mehr als 80 % in der Lagerstätte Olympic Dam. Die USA, Kanada und Kasachstan folgen mit bereits wesentlich geringeren Mengen von 472, 420 und 402 kt U. Während Australien, Kanada und Kasachstan auch große Produzenten sind, ist die Uranproduktion in den USA vergleichsweise gering (Abb. 2.4), was auf höhere Produktionskosten zurückzuführen ist.

Sieben weitere Länder weisen im Red Book 2011 (OECD-NEA/IAEA 2012) mehr als 100 kt U in der Kategorie RAR, förderbar zu geringeren Kosten als 260 US-Dollar/kg U, auf (Brasilien, China, Namibia, Niger, Russland, Südafrika, Ukraine; Tab. 3.1). Auf diese Länder wird in diesem Diskussionspapier im Detail eingegangen. Zusätzlich werden noch aufgrund ihrer Produktionszahlen von mehr als 1.000 t U im Jahr 2012 Malawi und Usbekistan genauer beschrieben.

In der Kostenkategorie < 130 US-Dollar/kg U weisen zehn Länder mehr als 100 kt U aus, mehr als 90 % der Ressourcen liegen in diesen Ländern.

Insgesamt betrachtet ist die Verteilung von Uranressourcen zwar als ungleich zu sehen, jedoch für metallische Rohstoffe nicht ungewöhnlich (DIHK 2012). Die Wahrscheinlichkeit ernsthafter Lieferengpässe bedingt durch das Ausfallen eines Produzenten in einem bestimmten Land oder politische Unruhen in einem Land wird von Frimmel (2010) als gering eingestuft. Quellen aus dem Kreditversicherungsbereich sehen das Gros der Lieferländer im Wesentlichen als politisch und wirtschaftlich relativ stabil an (Delcredere-Ducroire 2013).

3.1 Primäre Ressourcen



Tab. 3.1 Stand der verhältnismäßig gesicherten Ressourcen (1.1.2011)

verhältnismäßig gesicherte Ressourcen	< 40 US-Dollar/ kg U	< 80 US-Dollar/ kg U	< 130 US-Dollar/ kg U	< 260 US-Dollar/ kg U
Australien		961.500	1.158.000	1.180.100
Brasilien	137.900	155.700	155.700	155.700
China	45.800	88.500	109.500	109.500
Kanada	237.900	292.500	319.700	421.900
Kasachstan	17.400	244.900	319.900	402.400
Malawi			10.000	11.300
Namibia		5.900	234.900	362.600
Niger	5.500	5.500	339.000	340.600
Russland		11.800	172.900	218.300
Südafrika		96.400	144.600	192.900
Ukraine	2.800	44.600	86.800	143.300
USA		39.100	207.400	472.100
Usbekistan	46.600	46.600	64.300	64.300
andere		21.800	132.800	303.700
gesamt	493.900	2.014.800	3.455.500	4.378.700

Quelle: OECD-NEA/IAEA 2012

Aus einer anderen Sichtweise ist Uran als Energierohstoff zu betrachten. Für Energierohstoffe ist es sehr ungewöhnlich, dass die Hälfte der weltweiten Produktion durch 7 oder 8 Produktionsstätten gedeckt werden muss. Daher können sich Störungen in einzelnen Minen erheblich auf die Versorgungslage auswirken (ausführlicher Kap. 3.1.5). Knapp zwei Drittel der Uranproduktion sind in der Hand von den 4 Unternehmen Cameco, Rio Tinto, Areva, Kazatomprom, was ebenfalls Instabilitäten auf dem Uranmarkt bedingen könnte. Weiterhin finden mehr als drei Viertel der weltweiten Uranproduktion in Kasachstan, Kanada, Australien, Niger und Namibia statt (Abb. 2.4).

Identifizierte Ressourcen

Global werden rund 7.100 kt U in dieser Kategorie (RAR u. IR) ausgewiesen. Das Gesamtbild ändert sich dabei kaum. Es finden sich 89% der Ressourcen zu weniger als <260 US-Dollar/kg U in denselben elf Ländern wie in der bereits angeführten Unterkategorie der RAR. Lediglich die Reihenfolge ändert sich ein wenig. Australien ist auch in dieser Kategorie das Land mit den größten Res-



sources, gefolgt von Kasachstan und Russland. Die USA findet sich nur noch auf Platz 9, was allerdings darauf zurückzuführen ist, dass keine IR ausgewiesen werden.¹⁵

Tab. 3.2 Stand der identifizierten Ressourcen (1.1.2011)

identifizierte Ressourcen	< 40 US-Dollar/ kg U	< 80 US-Dollar/ kg U	< 130 US-Dollar/ kg U	< 260 US-Dollar/ kg U
Australien		1.349.400	1.661.600	1.738.800
Brasilien	137.900	229.300	276.700	276.700
China	59.200	135.000	166.100	166.100
Kanada	350.800	416.800	468.700	614.400
Kasachstan	47.400	485.800	629.100	819.700
Malawi			12.300	17.000
Namibia		6.600	261.000	518.100
Niger	5.500	5.500	421.000	445.500
Russland		55.400	487.200	650.300
Südafrika		186.000	279.100	372.000
Ukraine	6.400	61.500	119.600	224.600
USA		39.100	207.400	472.100
Usbekistan	71.300	71.300	96.200	96.200
andere	2.400	36.800	241.200	685.100
gesamt	680.900	3.078.500	5.327.200	7.096.600

Quelle: OECD-NEA/IAEA 2012

Alternative andere Ressourcenabschätzungen

Zu anderen Ressourcenkategorien, aber auch unkonventionellen Ressourcen finden sich im Red Book zwar sehr wohl Angaben, jedoch werden diese aufgrund der wenig fortgeschrittenen Explorationstätigkeit, der damit einhergehenden Unsicherheit ihrer Existenz, und der ökonomischen Rahmenbedingungen nicht in weitere Versorgungsüberlegungen miteinbezogen.

Eine detaillierte Evaluierung der Ressourcen anhand von Projekten und teilweise auch unkonventionellen Lagerstätten wurde von Frimmel (2010) durchgeführt. Aber auch dort werden die im Red Book 2009 (OECD-NEA/IAEA 2010) ausgewiesenen unentdeckten Ressourcen als spekulativ, in man-

15 In den USA wird ein anderes Klassifikationsschema angewandt, sodass eine Trennung von IR und Teilen der unentdeckten Ressourcen nicht möglich ist und diese Ressourcen aufgrund ihrer Unsicherheit somit auch nicht in die Klassifikation der OECD-NEA/IAEA einfließen können.



chen Fällen aus geologischer Sicht unrealistisch gesehen und finden keine weitere Berücksichtigung.

Nach Frimmel (2010) finden sich in den derzeit produzierenden Minen noch Erzressourcen (inklusive eventuell ausgewiesener Erzreserven) von ca. 13.152 Mio. t. Erz mit einer darin enthaltenen Urangesamtmenge von 4.560 kt. Etwa 350 kt U davon sind als Reserven definiert, wobei zu beachten ist, dass für etliche Großproduzenten wie Usbekistan, China und Russland keine separaten Angaben zu den Reserven verfügbar sind.

Insgesamt erfasste Frimmel (2010) 8.750 kt U, die 6.300 kt U an identifizierten Ressourcen aus dem Red Book 2009 der OECD-NEA/IAEA (2010) gegenüberstehen (Tab. 3.3). Diese Diskrepanz spiegelt sich in zum Teil markanten Unterschieden in länderbezogenen Ressourcen wider. Sehr große Unterschiede liegen in den Ressourcenangaben für Olympic Dam (und somit für Australien als Ganzes), die im Red Book 2009 deutlich pessimistischer angesetzt wurden (-1.260 kt U), aber auch in den nationalen Ressourcen von Brasilien und China, die im Red Book 2009 deutlich höher angesetzt wurden (220 kt U bzw. 60 kt U). Eine wesentliche Differenz liegt auch in den in Halden des südafrikanischen Goldbergbaus ausgewiesenen 800 kt U vor, die im Red Book 2009 überhaupt nicht als Ressource berücksichtigt wurden. Weitere große Unterschiede findet man in der Bewertung der schwärzschiefergebundenen Vorräte – das größte Vorkommen von Viken in Schweden wurde im Red Book 2009 nicht angeführt (-455 kt U). Auch die Einschätzung der an Granit gebundenen Vorräte, konkret jener in Namibia, ist im Red Book 2009 deutlich pessimistischer (-230 kt U). Umgekehrt schätzte Frimmel (2010) die kasachischen (200 kt U) und die US-amerikanischen (130 kt U) Ressourcen deutlich ungünstiger ein. Hier spielt die unterschiedliche Differenzierung zwischen konventionellen und unkonventionellen Ressourcen, aber auch die Verwendung von aktualisierten Daten aus dem Red Book 2009 in Frimmel (2010) eine Rolle.

Spekulative Ressourcen

Zuletzt müssen an dieser Stelle die spekulativen Ressourcen angeführt werden. Diese sind im Allgemeinen nicht nach genetischen Gesichtspunkten untergliedert und in manchen Fällen aus geologischer Sicht unrealistisch. In jedem Fall sind noch umfangreiche Explorationstätigkeiten nötig, um deren Existenz zu bestätigen und mögliche Mengen und Konzentrationen zu bestimmen (OECD-NEA/IAEA 2010, S. 28). Für spekulative Ressourcen sind Urankonzentrationen zu erwarten, die in der Größenordnung von 0,01 %, also sehr niedrig liegen. Aus heutiger Sicht können diese nicht für eine wirtschaftliche Nutzung in Betracht gezogen werden und finden daher im Normalfall auch keinen Eingang in Verfügbarkeitszenarien. Dennoch wurden prognostizierte und spekulative Ressourcen mit insgesamt etwa 10 Mio. t U auch im Red Book 2009 (OECD-NEA/IAEA 2010) ausgewiesen. Hier gab es in den letzten Jahren keine wesentlichen



3 Reserven und Ressourcen

Änderungen, wenngleich auch hier eine Verschiebung hin zu höheren bzw. unbestimmten Kostenkategorien zu beobachten ist.

Tab. 3.3 Vergleich der gesamten Uranressourcen nach Ländern

	Ressourcen in kt U*	Ressourcen in kt U**			
		< 40 US-Dollar/kg	< 80 US-Dollar/kg	< 130 US-Dollar/kg	< 260 US-Dollar/kg
Ägypten					1,9
Algerien				19,5	19,5
Argentinien	6,5		11,4	19,1	19,1
Australien	2.938,5		1.612,0	1.673,0	1.679,0
Botswana	38,0				
Brasilien	57,0	139,9	231,3	278,7	278,7
Chile					1,5
China	112,5	67,4	150,0	171,4	171,4
Grönland	108,5				85,6
Deutschland					7,0
Finnland	1,2			1,1	1,1
Frankreich				0,1	9,1
Gabun				4,8	5,8
Griechenland					7,0
Guyana	2,5				
Indien	73,6			80,2	80,2
Indonesien				4,8	6,0
Iran					2,2
Italien	1,1			4,8	6,1
Japan				6,6	6,6
Jordanien			111,8	111,8	111,8
Kamerun	12,2				
Kanada	540,1	366,7	447,4	485,3	544,7
Kasachstan	636,3	44,4	475,5	651,8	832,0
Kongo D.R.					2,7
Malawi	24,1		8,1	15,0	15,0
Mali	14,1				
Mexiko					1,8
Mongolei	56,9		41,8	49,3	49,3
Namibia	515,1		2,0	284,2	284,2
Niger	277,0	17	73,4	272,9	275,5
Paraguay	3,7				

3.1 Primäre Ressourcen



Peru	2,6			2,7	2,7
Portugal	1,9		4,5	7,0	7,0
Rumänien	11,0			6,7	6,7
Russland	646,8		158,1	480,3	566,3
Sambia	14,6				
Schweden	466,1			10,0	10,0
Simbabwe					1,4
Slowakei	26,9				10,2
Slowenien				9,2	9,2
Somalia					7,6
Spanien	43,6		2,5	11,3	11,3
Südafrika	1.270,8***	153,3	232,9	295,6	295,6
Südkorea	13,5				
Tansania	34,5				28,4
Tschechien	45,0		0,5	0,5	0,5
Türkei	5,6			7,3	7,3
Ukraine	273,6	5,7	53,5	105,0	223,6
Ungarn	11,5				8,6
USA	341,6		39,0	207,4	472,1
Usbekistan	111,1		86,2	114,6	114,6
Vietnam					6,4
Zentral-afrikanische Republik	13,5			12,0	12,0
gesamt	8.753,1	794,4	3.741,9	5.404,0	6.306,3

*** Beinhaltet 800 kt U in den Goldbergbauhalden Südafrikas.

Eigene Zusammenstellung nach * Frimmel 2010; ** OECD-NEA/IAEA 2010

Auch Frimmel (2010) verwendet keine spekulativen Ressourcen und begründet das wie folgt: »Rein theoretisch ist die gesamte oberste Erdkruste eine spekulative Ressource für so gut wie jeden Rohstoff. Bei Rohstoffen, für deren Verwendung keine Alternativen bekannt sind, könnten spekulative Ressourcen bei entsprechend hohem Preis tatsächlich irgendwann wirtschaftliche Bedeutung gewinnen. Bei U[ran] ist das nicht der Fall. Solange U[ran] in erster Linie zur Stromerzeugung genutzt wird, gibt es einen thermodynamischen Grenzwert, ab dem sich der Abbau nicht mehr lohnt (d. h., wenn mehr Energie für die Gewinnung von U[ran] aufgewendet werden muss, als aus dem geförderten U[ran] gewonnen werden kann [Kap. 4.3]), und zwar egal wie hoch der Preis für U[ran] sein mag. Es scheint daher müßig, spekulative Uranressourcen in die Diskussion über die Verfügbarkeit von U[ran] mit einzubeziehen. Hierzu sei schließlich noch festgestellt, dass aus der jüngeren Vergangenheit so gut wie keine Bei-



spiele bekannt sind, in denen spekulative Ressourcen bis zum Status der [identifizierten Ressourcen] aufgestiegen wären.«

3.1.2.2 Entwicklung des Ressourcenstands

Ein erster Blick auf die Zahlen seit Beginn der systematischen Erfassung der Ressourcen zeigt einen kontinuierlichen Anstieg der Ressourcen. Seit dem ersten Red Book von 1970 erhöhten sich die RAR von 1,2 auf 4,4 Mio. t (in allen Kostenkategorien). Im gleichen Zeitraum (bis 2010) wurden etwa 2 Mio. t in Reaktoren eingesetzt.¹⁶ Was bei der Darstellung der Entwicklung des Ressourcenstands aber oft nicht berücksichtigt wird, ist der Umstand, dass in den Anfangsjahren wesentlich weniger Länder ihre Ressourcen ausgewiesen haben. Somit war ein Wachstum in den globalen Ressourcenzahlen oft nur ein Resultat des Hinzufügens neuer Länderressourcen, wie z. B. seinerzeit aus den Ländern der ehemaligen Sowjetunion. Ein aussagekräftiges Bild zur globalen Ressourcenentwicklung muss auf einer gleichbleibenden Länderbasis beruhen, wie dies in etwa für die letzten 15 Jahre der Fall war. In Abbildung 3.2 ist der in den Red-Book-Ausgaben angeführte identifizierte Ressourcenstand (RAR u. IR) für diesen Zeitraum dargestellt.

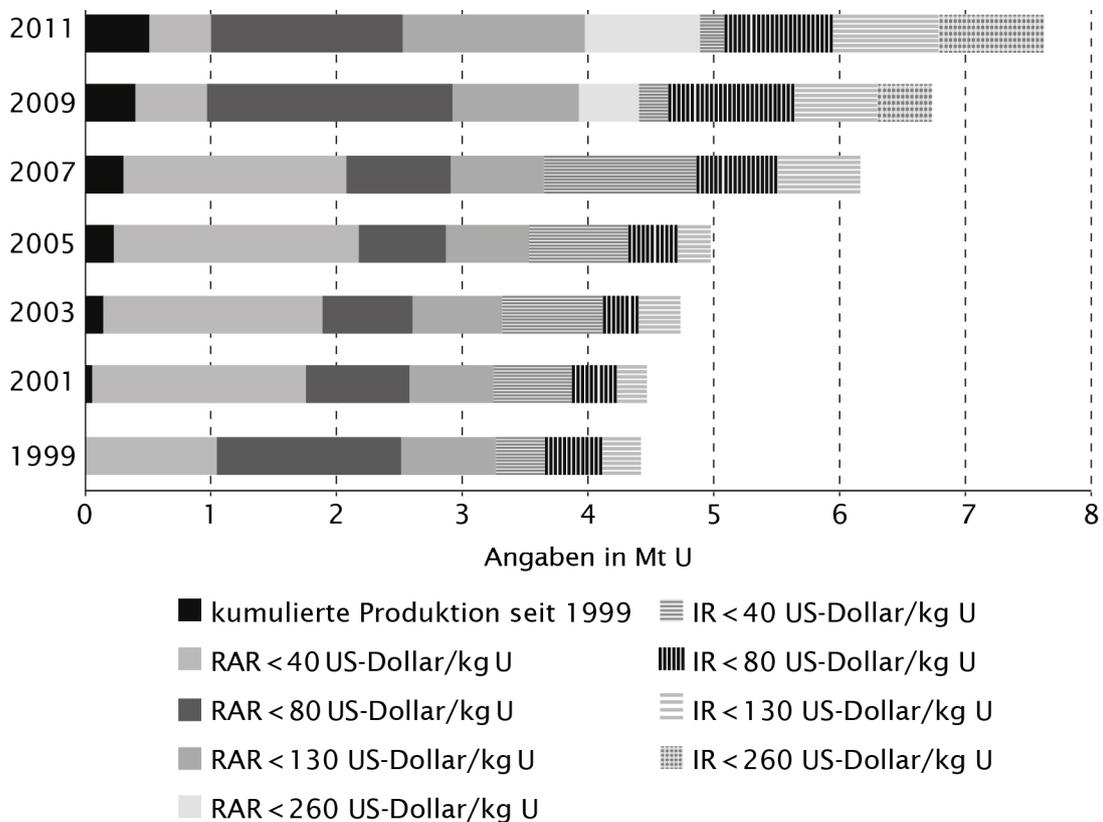
Betrachtet man die RAR < 130 US-Dollar/kg U, so ist dieser Stand seit 1999 in etwa gleichgeblieben (3,3 bis 3,5 Mio. t U), während gleichzeitig rund 500 kt U gefördert wurden. Die zusätzlichen vermuteten Ressourcen (IR) in dieser Kostenkategorie erhöhten sich im selben Zeitraum um etwa 60 %, wobei die aktuellen Zahlen wieder 12 % unter dem Höchstwert von 2007 lagen. Zusätzlich wurde, wie bereits erwähnt, 2009 die Kostenkategorie < 260 US-Dollar/kg U wieder eingeführt. Dies waren 2009 weitere 480 kt U an RAR und 429 kt U an IR bzw. 2011 920 kt U und 850 kt U.

Analysiert man die Entwicklung der Ressourcen in einzelnen Ländern (Zittel et al. 2013), so ist ein Großteil dieses Zuwachses der identifizierten Ressourcen auf Australien zurückzuführen (750 kt U bei einem Gesamtwachstum der identifizierten Ressourcen < 130 US-Dollar/kg U um 910 kt U), und dort auf die Lagerstätte Olympic Dam. Daneben zeigt sich auch ein Wachstum der Uranressourcen Russlands. Hier liegt etwa die Hälfte des Urans in der Elkon-Lagerstätte, die schon länger bekannt ist, aber erst Mitte des letzten Jahrzehnts neu evaluiert wurde und seit 2007 auch in Ressourcenangaben des Landes mit einfließt. Als drittes Land konnte noch Niger einen wesentlichen Anstieg der Ressourcen in der Kategorie < 130 US-Dollar/kg U verzeichnen. Auch hier liegen die wesentlichen Änderungen in der Reevaluierung einer einzelnen Lagerstätte (Imouraren) begründet. Die anderen Länder verzeichnen über den gesamten Zeitraum eher rückläufige Ressourcenzahlen.

¹⁶ Die gesamte Uranproduktion belief sich bis 2010 auf knapp 2,6 Mio. t.



Abb. 3.2 Entwicklung des globalen Ressourcenstands von 1999 bis 2011



RAR = vermutete gesicherte Ressourcen; IR = vermutete Ressourcen

Eigene Darstellung mit Daten aus OECD-NEA/IAEA 2006a, 2006b, 2008, 2010 u. 2012

Das Auffälligste an der Aufstellung der vergangenen Ressourcenzahlen ist aber wohl die Entwicklung hin zu hohen Kostenkategorien. Dieser Trend begann 2009 bei der niedrigsten Kostenkategorie (<40-Dollar/kg U) und setzte sich 2011 in der nächsthöheren Kategorie fort, sodass in einigen Ländern die Ressourcen < 80 US-Dollar/kg U nur noch wenige Prozent der Gesamtmenge ausmachen (z. B. Namibia, Tab. 3.11; Niger, Tab. 3.12; Russland, Tab. 3.13). Dies ist Ausdruck der steigenden Produktionskosten.

Die gestiegenen Uranabbaukosten sind von verschiedenen Faktoren abhängig, darunter auch den Energiepreisen (vor allem dem Ölpreis) (OECD-NEA/IAEA 2010, S. 15). Wesentliche Mengen an billigem Uran <40 US-Dollar/kg U wurden 2011 nur noch in fünf Ländern ausgewiesen, allen voran Kanada mit den Minen hoher Erzkonzentration im Athabascabecken. IANUS (2011) weist darauf hin, dass aber gerade diese Mengen jene sind, die als gesichert abbaubar gelten und für die gegenwärtigen Produktionsszenarien der Minenbetreiber die höchste Relevanz haben. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) klassifiziert nur die gesicherten Vorkommen mit



Gewinnungskosten unter 40 US-Dollar/kg U als Reserven, das sind »die Mengen eines Energierohstoffes, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können« (BGR 2009, S. 23). Dementsprechend ist der auffällige und erhebliche Einbruch der Zahlenangaben in der Kategorie der günstigsten Produktionskosten (<40 US-Dollar/kg U), der von 2007 auf 2009 erfolgte, nicht unwesentlich. Während 2005 noch 1.947 kt U in der RAR-Kategorie <40 US-Dollar/kg U klassifiziert wurden, waren es 2011 nur noch 493 kt U. Diese Veränderung hat nichts mit realem Verbrauch zu tun, sondern ist das Resultat einer Umkategorisierung entsprechend der zu erwartenden Produktionskosten.

Diese Verschiebung bei den Kosten erscheint heute insbesondere im Zusammenhang mit niedrigen Marktpreisen und den langen Vorlaufzeiten für die Inbetriebnahme von Minen (Kap. 3.1.7) problematisch. Der Anreiz für Firmen, neue Minen zu hohen Kosten in Betrieb zu nehmen, ist gering und spiegelt sich auch in der Verzögerung der laufenden Projekte wider. Schließlich haben Uranmengen, die in höheren Produktionskostenkategorien eingeordnet sind, abnehmende Relevanz für eine tatsächlich erfolgende Urangewinnung. Es wachsen – zumindest vom heutigen Standpunkt aus gesehen – die Zweifel an einer tatsächlichen Abbaubarkeit, bei der auch ökonomische Kriterien mitberücksichtigt werden müssen.

3.1.3 Wesentliche Länder des Uranmarktes

In diesem Teilkapitel wird auf Basis des Gutachtens von IANUS (2011) ein Überblick über die wichtigsten uranproduzierenden Länder gegeben.

Derzeit kommen fast zwei Drittel (63,6 %) der gesamten primären Uranproduktion aus nur drei Ländern: Australien, Kanada und Kasachstan. Im Folgenden werden diese drei und zehn weitere Länder, die für den globalen Uranmarkt von Bedeutung sind, genauer beleuchtet. Die Auswahl der Länder richtet sich vor allem nach ihren aktuellen Produktionszahlen, aber auch nach der Größe der vermuteten Uranvorkommen.

In der Regel wurden für die Vorkommen in den einzelnen Ländern die jeweiligen Angaben aus dem Red Book 2011 (OECD-NEA/IAEA 2012) herangezogen, die sich auf den Stichtag 1. Januar 2011 beziehen. In den ausgewählten Ländern befanden sich 3.320 kt U RAR bzw. 5.090 kt U identifizierte Ressourcen (RAR u. IR). Die Mengen machen einen Anteil von 96,1 % bzw. 95,4 % der angegebenen global vorhandenen Vorkommen in der Preiskategorie <130 US-Dollar/kg U aus (OECD-NEA/IAEA 2012).

Die gesamte Produktion der 13 berücksichtigten Länder belief sich 2012 auf 57.500 t U und entspricht 97 % und somit fast der kompletten weltweiten Uranproduktion.



3.1.3.1 Australien

Australien ist das Land mit den mit Abstand größten Uranressourcen (Tab. 3.4). 2011 waren es 1.180 kt U RAR bzw. 1.738 kt U identifizierte Ressourcen jeweils förderbar zu Kosten <260 US-Dollar/kg U (OECD-NEA/IAEA 2012). Ein wesentlicher Anteil davon (je nach Ressourcenkategorie 70 bis 80 %) findet sich in der Lagerstätte Olympic Dam, die bereits als IOCG-Lagerstätte vorgestellt wurde (Kap. 2.1.1). 2012 wurden in Australien etwa 7.000 t U gefördert (WNA 2013j), womit es der weltweit drittgrößte Uranproduzent ist.

Tab. 3.4 Kennzahlen Australien

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 80 US-Dollar/kg U	961.500	1.349.400			
< 130 US-Dollar/kg U	1.158.000	1.661.600	3	9.330	6.991
< 260 US-Dollar/kg U	1.180.100	1.738.000			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA (2012); ** WNA (2013j)

Die Suche nach Uranlagerstätten hatte in Australien in den Jahren 1969 bis 1975, gestützt durch die Wachstumserwartungen der zivilen Kernenergienutzung, ihren ersten Höhepunkt. In dieser Zeit wurde auch der Großteil der fast 100 bekannten Lagerstätten entdeckt, während in den folgenden 30 Jahren nur vier weitere Lagerstätten ausfindig gemacht wurden. Seit 2003 ist – begründet im Anstieg des Uranpreises – wieder eine merkliche Zunahme der Explorationsstätigkeit Australiens zu verzeichnen. Dennoch wurden auch im letzten Jahrzehnt nur drei weitere Lagerstätten entdeckt und der kontinuierliche Anstieg der australischen Ressourcen ist im Wesentlichen auf die Neuevaluation bekannter Lagerstätten zurückzuführen (Geoscience Australia 2013).

In Australien sind die Minen Olympic Dam, Ranger und Beverley aktiv. Die Minenbetreiber sind in allen drei Fällen australische Unternehmen. Die Mine Honeymoon befindet sich derzeit in der Pilotphase und ist in Mehrheitsbesitz von Uranium One Inc., welche wiederum eine Tochterfirma des russischen Staatsunternehmens Atomredmetzoloto Uranium Holding Co. (ARMZ) ist.

Australien besitzt außer den Minen so gut wie keine nukleare Industrie. Im Wesentlichen wird direkt das abgebaute Uran exportiert und dann in anderen Ländern weiterverarbeitet. Australische Firmen sind auch an Minenprojekten im Ausland, vor allem in Namibia, beteiligt.

3.1.3.2 Brasilien

Die Uranproduktion in Brasilien liegt bisher in staatlichen Händen. Derzeit ist ein Produktionszentrum in Betrieb (Caetité) und ein weiteres in Planung (Santa Quitéria).

Alle dem Brennstoffkreislauf zugehörigen Industrieanlagen werden von Indústrias Nucleares do Brasil, einem Unternehmen des Ministério da Ciência e Tecnologia. Nach Angaben von OECD-NEA/IAEA (2010) gab es über viele Jahre hinweg keine Exploration. Es existiert eine Absichtserklärung zwischen Russland und Brasilien zur Zusammenarbeit auf dem Nuklearsektor, insbesondere auch bei der Exploration von Uranlagerstätten (WISE 2013b). Dennoch führen OECD-NEA/IAEA 2012 keine weitere Explorationstätigkeit an.

Bei der Angabe der nationalen Ressourcen gibt Brasilien nur Zahlen für die Preiskategorie < 130 US-Dollar/kg an (Tab. 3.5).

Tab. 3.5 Kennzahlen Brasilien

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	137.900	137.900			
< 80 US-Dollar/kg U	155.700	229.300	1	340	231
< 130 US-Dollar/kg U	155.700	276.700			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

Seit wenigen Jahren hat Brasilien eine eigene kommerzielle Anreicherungsanlage. Bisher wurde das brasilianische Uran nach Kanada zur Konversion und dann weiter nach Frankreich zur Anreicherung gebracht. Im eigenen Land werden daraus Brennelemente gefertigt (WNN 2009). Mit der Errichtung einer Konversionsanlage würde Brasilien also sämtliche Anlagen zur Brennelementherstellung besitzen und könnte zum Selbstversorger werden, sofern eine Steigerung der Produktion durch Expansion von Lagoa Real/Caetité und die Erschließung neuer Minen gelingt.

3.1.3.3 China

China hat einige kleinere Uranminen, jedoch häufig mit niedrigem Urangehalt. Die chinesische Uranproduktion reicht nicht aus, um den chinesischen Bedarf zu decken. Für den Betrieb der chinesischen Kernkraftwerke muss Uran importiert werden. Erstmals wurden Zahlen zu chinesischen Produktionszentren im Red Book 2011 (OECD-NEA/IAEA 2012, S. 193) veröffentlicht. Die Gesamtkapazität der chinesischen Uranproduktion wird auf 100.000 t U pro Jahr geschätzt.

3.1 Primäre Ressourcen



kapazität der dort angeführten Minen beläuft sich 2010 auf 1.350 t U mit einer geplanten Erweiterung auf 1.820 t U. Die Produktion wurde 2010 auf 1.350 t U sowie 2011 und 2012 auf 1.500 t U geschätzt (WNA 2013j). Die offiziell gemeldeten Produktionszahlen entsprechen dabei gleichzeitig der gesamten Kapazität und es kann vermutet werden, dass China – vielleicht aus politischen Gründen – nicht die tatsächliche Produktion, sondern immer nur die installierten Kapazitäten meldet. Diese Vermutung wird auch durch die Änderung der Produktionszahl für 2011 auf der Website der WNA (2013j) von 855 t U auf 1.500 t U im Laufe des Jahres 2013 bestätigt.

Tab. 3.6 Kennzahlen China

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	45.800	59.200			
< 80 US-Dollar/kg U	88.500	135.000	7	1.350	1.500
< 130 US-Dollar/kg U	109.500	166.100			
< 260 US-Dollar/kg U	109.500	166.100			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

Die chinesischen Uranminen werden alle von Unternehmen in Staatseigentum betrieben. Es gibt Bestrebungen zur Zusammenarbeit bei der Uranförderung im Ausland, etwa in Algerien, Kasachstan, der Mongolei, Namibia, Niger, Simbabwe und Usbekistan (WISE 2011f). Aktuell scheint aber ein Ausbau der inländischen Kapazitäten im Fokus zu stehen.

3.1.3.4 Kanada

Nachdem Kanada jahrelang der größte Uranproduzent war, wurde es 2009 von Kasachstan abgelöst und ist seitdem auf Rang 2 (WNA 2013i). In Kanada befinden sich Lagerstätten mit sehr hohem Urangehalt (Kap. 2.1). Mit McArthur River liegt dort auch die Uranmine mit der derzeit größten Jahresproduktion. Mit 7.500 t U lag die Uranproduktion 2012 bei 13% der globalen Gesamtmenge (WNA 2013j). Die Cigar-Lake-Mine mit ähnlicher Größe befindet sich seit längerem im Bau und wird in Kapitel 3.1.5 genauer dargestellt.

Daneben gibt es in Kanada die Projekte Midwest, Millennium, Wheeler River und einige weitere kleinere Projekte, bei welchen zurzeit noch keine Produktion stattfindet. Das Projekt Millennium ist schon weit fortgeschritten. 2013 wurde eine Umweltverträglichkeitsstudie abgeschlossen und der Betreiber Cameco (2014b) rechnete 2014 mit einer Entscheidung der Behörde bezüglich



der Umweltverträglichkeit, nannte jedoch keinen Zeitpunkt für einen Produktionsstart. Auch für andere Projekte gibt es derzeit keine genauen Pläne für den Beginn des Uranabbaus. Vielmehr ist zu erwarten, dass die Projekte aufgrund der derzeitigen, schlechten Marktlage, so wie z. B. Midwest (Denison 2014), vorläufig nicht intensiv weiterverfolgt werden.

Tab. 3.7 Kennzahlen Kanada

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	237.900	350.800			
< 80 US-Dollar/kg U	292.500	416.800	3	18.315	8.999
< 130 US-Dollar/kg U	319.700	468.700			
< 260 US-Dollar/kg U	421.900	614.400			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

Insbesondere an den Aktivitäten an den beiden großen Lagerstätten McArthur River und Cigar Lake, aber auch an vielen anderen Minen, ist das kanadische Unternehmen Cameco Corp. beteiligt. Cameco ist auch in Kasachstan im Uranbergbau aktiv. Weitere kanadische Unternehmen sind First Uranium Inc. (aktiv in Südafrika) und Uranium One, welches jedoch Anfang 2013 vollständig von der russischen ARMZ übernommen wurde (Koven 2013). In verschiedenen Regionen finden Explorationsaktivitäten und Probebohrungen statt. Die Ausgaben für Exploration in den letzten Jahren hatten 2007 mit etwa 380 Mio. Euro ihr Maximum (OECD-NEA/IAEA 2010). Mit dem Sinken des Uranpreises am Spotmarkt gingen auch die für Exploration ausgegebenen Gelder zurück.

In Kanada ist die Erlaubnis des Uranbergbaus häufig an die Zustimmung regionaler Ureinwohnergruppen geknüpft, was zu Verboten oder Verzögerungen beim Uranabbau führen kann (Kap. 3.1.5).

3.1.3.5 Kasachstan

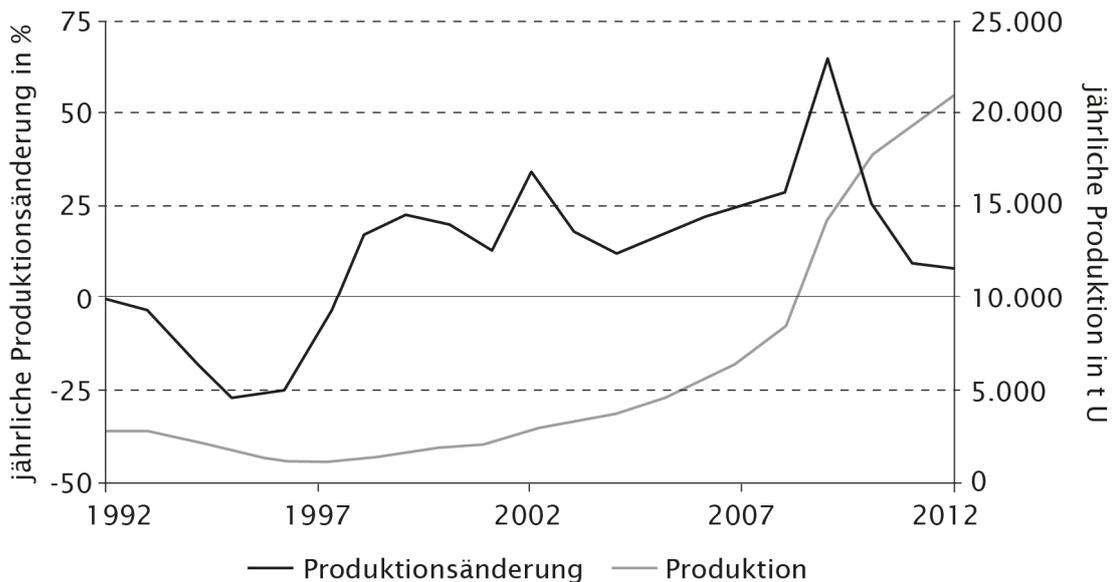
Kasachstan ist in den letzten Jahren zum größten Uranproduzenten der Welt aufgestiegen. Die deutliche Produktionssteigerung ist gut in Abbildung 3.3 zu erkennen. Die kasachische Regierung erließ 2004 ein Dekret, das einen Entwicklungsplan für die Uranindustrie bis 2015 beinhaltet. Erstes Ziel war die Produktion von 15.000 t U pro Jahr für 2010, was mit 17.800 t U sogar deutlich übertroffen wurde. In einem nächsten Schritt sollten 2015 30.000 t U produziert werden. Ein Erreichen dieses Zieles scheint aber gerade im Hinblick auf rück-

3.1 Primäre Ressourcen



läufigen Wachstumswerten der letzten beiden Jahre (Abb. 3.3) eher unwahrscheinlich.

Abb. 3.3 20-jährige Entwicklung der Produktionszahlen in Kasachstan



Dargestellt wird der Anstieg der Uranproduktion in Kasachstan seit den späten 1990er Jahren. Neben der gesamten Produktion ist auch die jährliche Änderung der Produktion dargestellt. Es zeigt sich, dass die Produktion in den letzten beiden Jahren zwar noch wächst, jedoch bei Weitem nicht mehr so stark wie in den Jahren davor.

Eigene Darstellung nach Zittel et al. 2013

Weiterhin will Kasachstan Haupthersteller von Brennstoffpellets für Reaktoren werden und sich so auf dem Weltbrennstoffmarkt noch fester verankern. In Kooperation mit Cameco soll eine Konversionsanlage gebaut werden, in der bis zu 12.000 t UF₆ pro Jahr produziert werden können (WNA 2013e). Zusammen mit Russland besteht seit 2006 eine Vereinbarung zur Errichtung von Anreicherungsanlagen. Im Juni 2008 wurde eine Zusammenarbeit mit Areva beschlossen. Demnach sollte eine Fabrik für Brennelemente aller Reaktortypen gebaut werden, mit Extraproduktionslinien für französischen Reaktorbedarf. Hier war die erste Produktion für 2013 geplant (OECD-NEA/IAEA 2010). In der vergangenen Zeit wurden jedoch keine Pressemitteilungen zum Produktionsstart gemacht.

Der Uranbergbau in Kasachstan liegt, über das staatliche Unternehmen Kazatomprom und dazugehörige Tochtergesellschaften, zu großen Teilen in der Hand des Staats. Laut OECD-NEA/IAEA (2012) waren 2010 55,9% der Aktivitäten in Staatsbesitz, 22,8% im Besitz von ausländischen privaten Unternehmen (z. B. Cameco und Areva) und 21,5% Eigentum ausländischer Staatsfirmen (vornehmlich Uranium One).

Tab. 3.8 Kennzahlen Kasachstan

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	17.400	47.400			
< 80 US-Dollar/kg U	244.900	485.800	17	26.000	21.317
< 130 US-Dollar/kg U	319.900	629.100			
< 260 US-Dollar/kg U	421.900	819.700			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

Die Mehrheit der kasachischen Uranproduktionszentren (zurzeit 17 aktive, Tab. 3.9) arbeitet mit ISL. In lediglich einem Produktionszentrum, zu dem die Minen Vostok und Zvezdnoye gehören, wird Uran unter Tage abgebaut. Für die Umsetzung des schnellen Ausbauplans der ISL-Technologie hat sich die Verfügbarkeit von Schwefelsäure als wesentliches Kriterium herausgestellt (Kap. 3.1.5).

Tab. 3.9 Minen in Kasachstan

Mine	Betreiber	Erzgehalt	Minentyp	Status
Akbastau	JSC Akbastau	0,099	ISL	in Betrieb
Akdala	Betpak-Dala	0,045	ISL	in Betrieb
Inkai	Inkai JV	0,049	ISL	in Betrieb
Inkai South	Betpak-Dala	0,037	ISL	in Betrieb
Kanzhugan	Taukent Mining und Chemical Plant LLP	0,046	ISL	in Betrieb
Karamurun	Kazatomprom	0,081	ISL	in Betrieb
Karatau	JSC Karatau	0,093	ISL	in Betrieb
KATCO	KATCO	0,076	ISL	in Betrieb
Kharasan 1	Kyzylkum	0,1	ISL	in Betrieb
Kharasan 2	BAIKEN U JV	0,108	ISL	Pilot
Moinkum South	Taukent Mining und Chemical Plant LLP	0,046	ISL	in Betrieb
Mynkuduk Central	NAC Kazatomprom JSC	0,032	ISL	in Betrieb
Mynkuduk East	Stepnoye LPP	0,032	ISL	in Betrieb
Mynkuduk West	Appak JV	0,032	ISL	in Betrieb
Semizbai u. Irkol	Semizbai JV	0,05	ISL	in Betrieb
Uvanas	Stepnoye LPP	0,032	ISL	in Betrieb

3.1 Primäre Ressourcen



Vostok u. Zvezdnoye	RU-1	0,167	Unter-tagebau	in Betrieb
Zarechnoye	Zarechnoye JV	0,046	ISL	in Betrieb
Zhalpak	NAC Kazatomprom JSC	0,035	ISL	in Planung

Quellen: Areva 2013; Cameco 2013; OECD-NEA/IAEA 2012; Uranium One 2012

3.1.3.6 Malawi

Mit der Inbetriebnahme der Kayelekera Mine ist Malawi in der Liste jener Länder die mehr als 1.000 t U pro Jahr produzieren. Die Anlagen wurden 2009 in Betrieb genommen und sind zu 85 % in Besitz von Paladin Energy Ltd. (Australien) – gleichzeitig auch der Betreiber – und zu 15 % in staatlicher Hand. Mit einer Gesamtinvestitionssumme von mehr als 500 Mio. US-Dollar ist es die größte direkte ausländische Investition in Malawi (AFRODAD 2013). Die Mine hat eine Kapazität von 1.270 t U pro Jahr und ein 9-jähriger Betrieb ist vorerst geplant (OECD-NEA/IAEA 2012). 2013 wurden für die Mine 9.000 t U an RAR und zusätzlich 2.900 t U an vermuteten Ressourcen ausgewiesen (Paladin Energy 2013). Dies entspricht auch in etwa den gesamten Ressourcen des Landes, da außer Kayelekera nur für eine weitere, kleinere Lagerstätte des Landes Ressourcenabschätzungen vorhanden sind.

Tab. 3.10 Kennzahlen Malawi

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 130 US-Dollar/kg U	10.000	12.300	1	1.270	1.101
< 260 US-Dollar/kg U	11.300	17.000			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

3.1.3.7 Namibia

In Namibia gibt es schon lange Aktivitäten im Uranbergbau, diese beschränkten sich jedoch lange vor allem auf den Abbau in der großen Rössing-Mine. Erst 2007 kam mit der Mine Langer Heinrich eine zweite große Produktionsstätte hinzu. Bis zum Ende 2010 wurden in Namibia insgesamt 104.600 t U produziert, zur Gänze im Tagebau.

In den nächsten Jahren ist eine weitere Produktionssteigerung vor allem durch die Inbetriebnahme von Husab (Rössing South) möglich. Der Baubeginn für diese Mine war 2013 und mit einer ersten Produktion wurde innerhalb der nächsten 3 Jahre gerechnet (MiningNe.ws 2013). Der Abbau an der Produkti-



onsstätte Trekkopje, die sich im Besitz der französischen Firma Areva befindet, wurde aufgrund der schlechten Marktlage wieder eingestellt (WISE 2013a). Von 2011 bis 2012 wurden hier im Pilotbetrieb insgesamt etwa 400 t U aus sehr niedriggradigem Erz gewonnen.

Laut dem Red Book 2011 der OECD-NEA/IAEA (2012) finden sich in Namibia etwa 260 kt U förderbar zu Kosten von weniger als 130 US-Dollar/kg, und etwa die doppelte Menge förderbar zu den doppelten Kosten (Tab. 3.11). In der Kategorie < 40 US-Dollar/kg sind keine Vorkommen gemeldet und auch in der Kategorie < 80 US-Dollar/kg nur wenige Tausend t (OECD-NEA/IAEA 2012, S. 18). Dies ist im Wesentlichen auf die niedrigen Erzkonzentrationen Namibias zurückzuführen (0,02 bis 0,05 % Urangelhalt). Im Uranminengeschäft in Namibia sind vor allem ausländische Unternehmen aktiv, insbesondere in den letzten Jahren hat sich das Spektrum der Interessenten deutlich diversifiziert. Beide aktiven Minen gehören mehrheitlich den australischen Minenkonzernen Rio Tinto und Paladin Energy.

Die Explorationsaktivitäten in Namibia sind mit dem ansteigenden Uranpreis des letzten Jahrzehnts ebenfalls stark gestiegen. Shindondola-Mote (2009) gibt über 40 vergebene Lizenzen zur Uranexploration und 12 neue Minenlizenzen an. WISE (2011d) listet rund 39 Unternehmen auf, die in Namibia Explorationsaktivitäten ausführen.

In Namibia wird die (Nicht-)Verfügbarkeit von Energie und Wasser für den Uranabbau immer wieder medial thematisiert und bedingt auch regelmäßig Produktionseinschränkungen (Kap. 3.1.5).

Tab. 3.11 Kennzahlen Namibia

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 80 US-Dollar/kg U	5.900	6.600			
< 130 US-Dollar/kg U	234.900	261.000	2	6.000	4.495
< 260 US-Dollar/kg U	362.600	518.100			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

3.1.3.8 Niger

Niger gehört zusammen mit Namibia aktuell zu den beiden großen uranproduzierenden Ländern in Afrika. Uran wird schon seit den 1970er Jahren abgebaut. Seit damals gibt es zwei arbeitende Projekte (SOMAIR, COMINAK) mit jeweils mehreren Minen die sich im Umkreis einer Erzverarbeitungsanlage befinden. Seit Kurzem wird Uranabbau auch in der Lagerstätte Azelik betrieben. Wesent-

3.1 Primäre Ressourcen



licher Investor war hier die China National Nuclear Corporation (CNNC). Zukünftig könnten weitere Projekte hinzukommen, etwa Imouraren (OECD-NEA/IAEA 2012, S. 339).

Tab. 3.12 Kennzahlen Niger

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	5.500	5.500			
< 80 US-Dollar/kg U	5.500	5.500	3	5.400	4.667
< 130 US-Dollar/kg U	339.000	421.000			
< 260 US-Dollar/kg U	340.600	445.500			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

Vor allem der französische Konzern Areva ist in Niger im Uranbergbau aktiv. Sowohl in der Société des Mines de l'Air (SOMAIR), die Minen rund um Arlit betreibt, als auch in der Compagnie Minière d'Akouta (COMINAK, Minen um Akouta) besitzt Areva mehrheitliche Anteile. Ebenso ist Areva an der Erschließung des Erzvorkommens Imouraren beteiligt.

Der Uranabbau in Niger findet sich immer wieder in öffentlicher Kritik, sei es wegen hoher Radioaktivitätslevels, durch aufgewirbelten Staub oder Sicherheitsmängel bei der Lagerung von Minenabraum (Kap. 3.1.5).

3.1.3.9 Russland

Russland gehört schon lange zu den großen Uranproduzenten der Welt. In den vergangenen Jahren wurden konstant etwa 3.000 t U pro Jahr produziert. Diese primäre Uranproduktion reicht allerdings nicht für den Uranbedarf russischer Leistungsreaktoren. In naher Zukunft ist jedoch vorgesehen, die Produktionskapazitäten deutlich auszubauen und weitere Minen zu erschließen (OECD-NEA/IAEA 2010). Pläne sehen vor, die Produktionskapazität bis 2020 auf bis zu 15.000 t U pro Jahr zu erhöhen (WNA 2013d). Dies spiegelt sich jedoch nur bedingt in den jüngsten Inbetriebnahmen wie bei Khiagda und Dalur wider. Andere Projekte (z. B. Gornoe und Elkon) sind wohl vor allem aus Gründen der derzeit schlechten Marktlage verzögert. Insgesamt werden in einer Veröffentlichung (ARMZ 2011) Projekte mit einer Kapazität von insgesamt 12.200 t U pro Jahr angeführt, wobei viele noch in frühen Planungsphasen sind. Basis dafür sollen die großen Uranvorkommen des Landes sein. Russland besitzt etwa 650 kt U identifizierter Ressourcen, abbaubar zu Kosten < 260 US-Dollar/kg U,



wovon die Hälfte im Elkon-distrikt vermutet wird. Mit der Inbetriebnahme einer Mine ist dort allerdings nicht vor 2020 bis 2025 zu rechnen.

Der Uranbergbau im Land wird von ARMZ dominiert, ein Subunternehmen von JSC Atomenergoprom. Neben den Aktivitäten innerhalb Russlands ist ARMZ auch im Ausland aktiv.

Tab. 3.13 Kennzahlen Russland

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 80 US-Dollar/kg U	11.800	55.400			
< 130 US-Dollar/kg U	172.900	487.200	3	5.400	2.872
< 260 US-Dollar/kg U	218.300	650.300			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

3.1.3.10 Südafrika

Während Südafrika in den 1970er und 1980er Jahren mit bis zu 6.000 t Jahresproduktion einer der größten Uranproduzenten war, leistet es – mit 400 bis 600 t U – nur noch einen bescheidenen Beitrag zur globalen Produktion. Es gab vermehrte Bestrebungen, dies zu ändern (OECD-NEA/IAEA 2010; WNA 2013b). Dies spiegelte sich aber bisher kaum in den Produktionszahlen wider, befinden sich doch alle neueren Projekte in einem frühen Stadium.

In Südafrika ist Uran vor allem ein Rohstoff, der als Nebenprodukt des Goldbergbaus gewonnen werden kann. In der Vergangenheit wurde Uran, obwohl in den Resten der Goldproduktion enthalten, oft nicht weiterverarbeitet und verblieb in den Tailings. Jedoch ist es auch noch im Nachhinein möglich, dieses Uran aus den Tailings zu gewinnen, sofern ökonomische Anreize vorhanden sind. Hier liegt auch ein großes Potenzial der südafrikanischen Uranwirtschaft.

In Abbildung 3.4 wurde versucht, eine mögliche Zukunft der Uranproduktion in Südafrika darzustellen, wobei die Minen Vaal River, Randfontein, Ezulwini und Buffelsfontein (MWS) berücksichtigt wurden. Sie basiert auf Daten, die bis 2010 gesammelt wurden. OECD-NEA/IAEA (2010) nannte sogar noch höhere Werte, nach denen schon 2014 bis zu 4.240 t U pro Jahr produziert werden sollen.

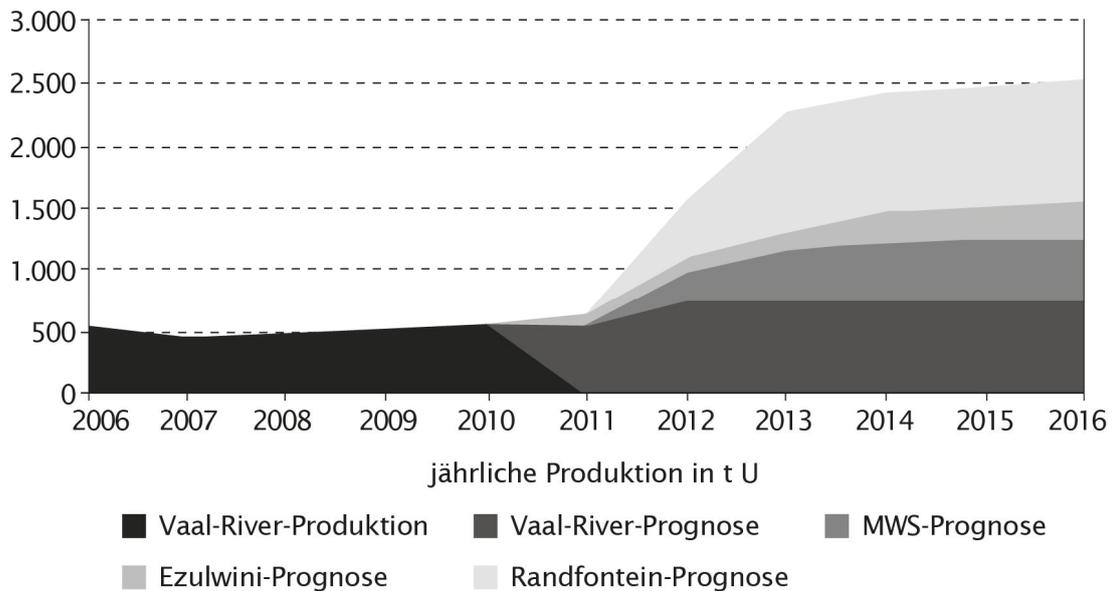
Da auch 2012 weniger als 500 t U produziert wurden, erweisen sich diese beiden Prognosen als deutlich zu optimistisch. Auch hier ist der Einbruch in den Uranpreisen als Ursache zu sehen. Im Red Book 2011 (OECD-NEA/IAEA 2012) wird mittlerweile nur noch eine Produktionsstätte zur Gewinnung von

3.1 Primäre Ressourcen



Uran aus Tailings angeführt. Andere Pläne werden als nicht gesichert bezeichnet (OECD-NEA/IAEA 2012, S. 383).

Abb. 3.4 Jahresproduktion der größten Uranminenprojekte in Südafrika



Quelle: nach IANUS 2011

Tab. 3.14 Kennzahlen Südafrika

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 80 US-Dollar/kg U	96.400	186.000			
< 130 US-Dollar/kg U	144.600	279.100	4	~ 1.400	465
< 260 US-Dollar/kg U	192.900	372.100			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

3.1.3.11 Ukraine

In der Ukraine wird derzeit deutlich mehr Uran verbraucht, als im Land gefördert wird. Im letzten Jahrzehnt wurden jährlich etwa 800 bis 900 t U produziert, was etwa 30 % des eigenen Verbrauches ausmacht. Angestrebt ist jedoch, in naher Zukunft vollständig von Importen unabhängig zu werden. Die ursprünglich geplante Produktionssteigerung auf 1.000 t U pro Jahr für 2011 wurde schließlich ein Jahr später erreicht. Die Produktionsrate soll bis 2020 weiter auf



5.000 t U pro Jahr und anschließend noch bis 2030 auf 6.000 t U pro Jahr gesteigert werden (WISE 2011c; WNA 2013c).

Nach Angaben von Wise (2011c) sind vier Unternehmen in der Exploration aktiv. Verglichen mit einigen anderen Ländern sind die Explorationsaktivitäten jedoch moderat, auch die diesbezüglichen Ausgaben sind in den letzten Jahren nur leicht gewachsen.

Bisher führt ausschließlich das ukrainische Staatsunternehmen Vostochny Mining and Ore-Dressing Combine (VostGok) die Uranförderung durch. Andere Unternehmen und Staaten versuchen jedoch, auch den Markt zu erschließen. 2006 wurde eine Vereinbarung zwischen dem australischen Unternehmen Uran Ltd. und den ukrainischen Behörden zu einer Zusammenarbeit getroffen, allerdings wurden die Pläne 2009 wieder aufgegeben. Mit Südkorea (2007) und Russland (2009) gab es Kooperationsabsichten (WISE 2011c; WNA 2013c).

Tab. 3.15 Kennzahlen Ukraine

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	2.800	6.400			
< 80 US-Dollar/kg U	44.600	61.500	1	1.500	960
< 130 US-Dollar/kg U	86.800	119.600			
< 260 US-Dollar/kg U	143.300	224.600			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013j

3.1.3.12 USA

Die USA zeichnen sich durch eine sehr diversifizierte Uranbergbaustruktur aus. Es existieren viele kleinere ehemalige, aktive und zukünftige Minenprojekte unterschiedlicher Betreiber. Dieser Umstand erhöht die Zahl zu berücksichtigender Faktoren bei einer Einschätzung zukünftiger Entwicklungen deutlich. Beispielsweise gehen die Angaben über die Anzahl angeblich aktiver Minen weit auseinander. In der Datenbank UDEPO (IAEA 2009) sind insgesamt 279 Minen gelistet, davon 8 geschlossene und 73 ausgebeutete. 98 Minen ruhen, 17 sind in Entwicklung, 73 in Exploration. Es werden 8 Minen als aktiv geführt. OECD-NEA/IAEA (2012, S. 429 ff.) führen 6 Produktionsstätten als in Betrieb, 2 als betriebsbereit und 8 in Entwicklung, nennen also keine der geschlossenen, ausgebeuteten oder ruhenden. Die U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA 2010) nennt überhaupt nur 4 aktive Produktionsstätten. Das sind 3 Anlagen zur Verarbeitung von mittels ISL gewonnenem Uran sowie eine Mühle für

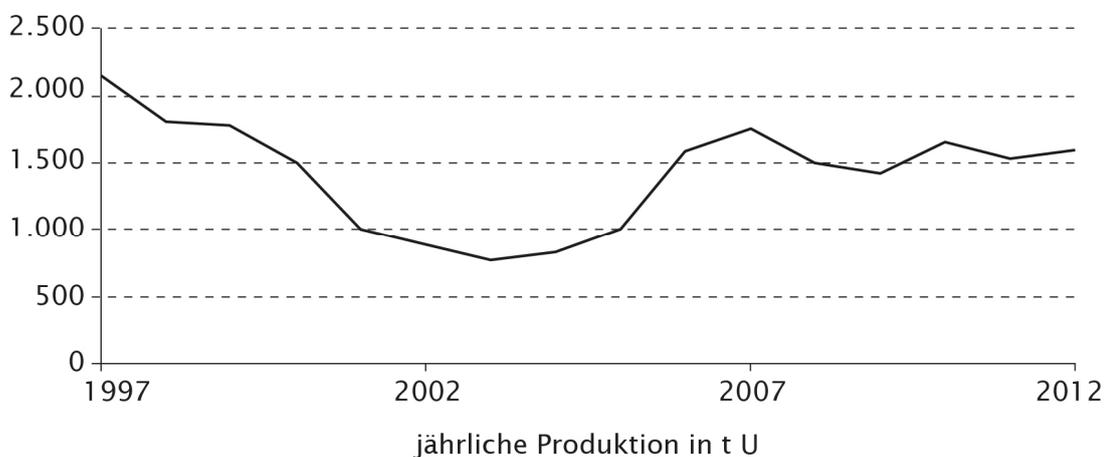
3.1 Primäre Ressourcen



Uranerz, die Erz von anderen konventionellen (vermutlich kanadischen) Minen verarbeitet (Energy Fuels 2013).

In Abbildung 3.5 ist die Produktion in den USA dargestellt. Auffällig ist der Rückgang der Produktion bis zu einem Tiefstand von 769 t U für 2003 und eine anschließende Steigerung. Unmittelbar nach dem Uranpreishoch 2007 ist jedoch ein Abfallen der Produktion erkennbar. Dies weist, wie auch der Rückgang der Produktion nach den Fukushima-Unfällen 2011, auf eine besondere Preisabhängigkeit amerikanischer Uranproduktion hin. Die Primärproduktion aus Minen deckt bei Weitem nicht den jährlichen Gesamtbedarf für das weltweit größte Kernenergieprogramm in den USA (etwa 19 kt U pro Jahr).

Abb. 3.5 Historische Produktionsmengen in den USA



Quelle: nach U.S. EIA 2010 u. 2013

Ein großer Teil des US-amerikanischen Uranverbrauchs in den letzten Jahren wurde durch das »Megatons to Megawatts Program« gedeckt (Kap. 3.2.1). Die jährliche Menge an Natururanäquivalent (U^*) aus diesem Programm liegt jedoch deutlich über dem Produktionsrückgang aus primären Quellen seit 1996 (etwa rund 7 kt U^* jährlich), sodass hier kein direkter Zusammenhang bestehen sollte, sondern sicherlich noch weitere Ursachen für den Rückgang verantwortlich sind. Die USA geben für die Red Books 2009 und 2011 (OECD-NEA/IAEA 2010 u. 2012) insgesamt 472 kt U an RAR an, IR werden nicht ausgewiesen. Im Red Book 2007 (OECD-NEA/IAEA 2008) wurden noch insgesamt 342 kt U an RAR angegeben, allerdings gab es da die Kategorie <260 US-Dollar/kg noch nicht.

Neben der Uranproduktion aus primären Quellen wurden in den USA auch bis einschließlich 2005 1.015 t U^* durch die Wiederanreicherung von abgereichertem Uran produziert. 2006 wurden auf gleiche Weise 924 t U^* produziert. Zusätzlich finden sich in den USA nach OECD-NEA/IAEA (2010) 98 kt U^* gelagertes Uran, verteilt auf 56 kt U^* in Vorräten der Regierung, 10 kt U^* in Vorräten der Produzenten und 32 kt U^* in Vorräten der Kraftwerksbetreiber. Die



Uranhersteller der USA (ein Konsortium aus 13 Firmen) wollen, dass das U.S. DoE seine Uranvorräte als strategische Reserve zurückhält, um für künftige Engpässe vorbereitet zu sein und entsprechenden Auswirkungen auf dem Uranmarkt gegensteuern zu können.

Tab. 3.16 Kennzahlen USA

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 80 US-Dollar/kg U	39.100	39.100			
< 130 US-Dollar/kg U	207.400	207.400	6	~ 5.000	1.596
< 260 US-Dollar/kg U	472.100	472.100			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013i

3.1.3.13 Usbekistan

Uranbergbau wird in Usbekistan schon seit 1950 betrieben. Alle drei großen Abbaumethoden kamen dabei zum Einsatz, jedoch wurde der Erzabbau unter Tage 1990 und im Tagebau 1994 eingestellt. Heutige Abbauprozesse basieren alle auf ISL. Usbekistan produziert seit vielen Jahren rund 2.000 bis 2.500 t U jährlich. 2009 betrug die Produktion etwa 2.400 t U und es war geplant, die Produktion bis 2012 um 50 % zu erhöhen (WISE 2011e). Laut WNA (2013j) wurden 2012 etwa 3.000 t U gefördert und somit dieses Ziel offensichtlich verfehlt.

Tab. 3.17 Kennzahlen Usbekistan

	RAR in t U*	identifizierte Ressourcen in t U*	Anzahl Minen*	Produktions- kapazität 2011 in t U*	Produktion 2012 in t U**
< 40 US-Dollar/kg U	46.600	71.300			
< 80 US-Dollar/kg U	46.600	71.300			
< 130 US-Dollar/kg U	64.300	96.200	3	3.500	3.000
< 260 US-Dollar/kg U	64.300	96.200			

Quellen: * OECD-NEA/IAEA 2012; ** WNA 2013i

In Usbekistan wird der Uranbergbau durch das Navoi Mining & Metallurgy Combinat betrieben, das Teil der Staatsfirma Kyzylkumredmetzoloto ist. Seit 1992 wird Uran in Zusammenarbeit mit dem deutschen Unternehmen NU-



KEM Energy, seit 2012 ein Tochterunternehmen der Cameco (Cameco 2013b), exportiert.

3.1.4 Exemplarische Minenprojekte

Da eine komplette Auflistung aller wesentlichen Uranminen den Umfang dieses Diskussionspapiers sprengen würde, wurde eine Auswahl von fünf exemplarischen Minen getroffen, die ein möglichst breites Spektrum abdecken sollen (Land, Abbautyp, Erzgehalt etc.). Die Beschreibungen dieser Minen basieren auf dem Gutachten von IANUS (2011) und wurden hierfür aktualisiert.

3.1.4.1 Olympic Dam

Die Mine Olympic Dam liegt im Bundesstaat South Australia. Die Lagerstätte wurde 1975 entdeckt und seit 1988 wird an dem Standort Kupfer als Hauptprodukt abgebaut. Gold, Uran und Silber werden als wesentliche Nebenprodukte gewonnen. Olympic Dam ist die größte Uranlagerstätte der Welt und befindet sich im Besitz des australisch-britischen Konzerns BHP Billiton, welcher auch der Betreiber ist.

2012 wies BHP Billiton (2013) 300.000 t U mit einem durchschnittlichen Urangehalt von 0,05 % als Reserven aus. Etwa 1,5 Mt U werden als RAR und 2,1 Mt U als identifizierte Ressourcen geführt. Die Urangehalte liegen dabei jedoch nur mehr bei 0,02 % bzw. 0,02 % (BHP Billiton 2013). Berücksichtigt man, dass fast 40 % des Urans im Gewinnungsprozess verlorengehen, finden sich immerhin noch mit etwa 0,9 Mt U RAR und 1,3 Mt U identifizierte Ressourcen ein Viertel der australischen und ein Fünftel der globalen Ressourcen in dieser Lagerstätte.

Der Uranabbau ist hier aber wegen des niedrigen Urangehalts – obwohl dieser höher als z.B. in den meisten Lagerstätten Namibias liegt – derzeit nur in Verbindung mit dem Abbau anderer Metalle wirtschaftlich. Das Erz wird im Untertagebau abgebaut, unterirdisch zerkleinert und überirdisch weiterverarbeitet. Die jährliche nominelle Produktionskapazität liegt bei 3.800 t U. Von Betriebsbeginn bis 2012 wurden insgesamt 56.500 t U gefördert. Im Geschäftsjahr Juli 2009 bis Juni 2010 musste Olympic Dam mit einer Produktion von 1.933 t U einen Produktionsrückgang um 43 % im Vergleich zum Vorjahr verzeichnen. Der Rückgang wird im Jahresbericht mit dem Ausfall der Förderanlage in einem Schacht begründet. Seit dem vierten Quartal des Geschäftsjahres 2010 arbeitet die Förderanlage wieder (BHP Billiton 2011).

Es liefen Bestrebungen für die Olympic-Dam-Expansion. 2011 wurde positiv über die Umweltverträglichkeit entschieden (WNN 2011). Start der Produktion war für 2016 angestrebt (OECD-NEA/IAEA 2010). Die Pläne wurden je-



doch 2012 wieder verworfen (WNN 2012), sodass zumindest für die nächsten 5 bis 10 Jahre mit einer unveränderten Kapazität zu rechnen ist.

Tab. 3.18 Kennzahlen Lagerstätte Olympic Dam

Eigentümer	BHP Billiton
Minentyp	Untertagebau
Entdeckung	1975
Betriebsbeginn	1988
Status	in Betrieb
Kapazität	3.800 t U pro Jahr
Reserven*	220.000 t U
RAR	910.000 t U
identifizierte Ressourcen	1.300.000 t U
Ø Erzgehalt (identifizierte Ressourcen)	0,022 % U
Gewinnungsfaktor**	61,2 %

* Angabe aus OECD-NEA/IAEA 2012. Ein Datenvergleich lässt vermuten, dass in den Angaben zu den Reserven bei BHP Billiton die metallurgische Gewinnungsrate nicht berücksichtigt wurde.

** Der Gewinnungsfaktor ist in den Angaben zu Reserven und Ressourcen bereits berücksichtigt. Etwa 15 % bleiben beim Abbau zurück. Die metallurgische Gewinnungsrate liegt bei 72 %.

Quellen: BHP Billiton 2013; OECD-NEA/IAEA 2012

3.1.4.2 Cigar Lake

Das Minenprojekt Cigar Lake liegt in der kanadischen Provinz Saskatchewan. Der Betreiber ist das kanadische Unternehmen Cameco. Cameco besitzt an der Mine einen Anteil von 50,025 %. Die französische Firma Areva besitzt 37,1 %, der Rest teilt sich auf die zwei japanischen Unternehmen Idemitsu Kosan mit 7,825 % und Tokio Electric Power Corporation Resources Inc. mit 5,0 % auf (Cameco 2010a).

Die Mine wird im Untertagebau betrieben. Teile des Erzkörpers werden zuerst vollständig vereist. Danach wird mit der Jet-Bore-Mining-Methode der Erzkörper abgetragen. Dabei wird unterhalb eines Schachts eine dünne Bohrung in den Erzkörper durchgeführt, durch die dann über Wasserstrahlen mit hohem Druck Erz gelöst, nach unten gespült und anschließend von dort aus weitertransportiert wird (Cameco 2013a). Die Abtrennung des Urans aus Erzschlamm wird nicht in direkter Nähe der Mine selbst, sondern an den Standorten McClean Lake und Rabbit Lake ausgeführt. In McClean Lake wird das gesamte Erz gelaut. Reinigung und Umwandlung zu U_3O_8 erfolgen anschließend an

3.1 Primäre Ressourcen



beiden Standorten. Die dortigen Verarbeitungseinrichtungen existieren zu großen Teilen schon von früheren Minen, müssen aber erweitert werden. Im Endausbau soll eine Produktion von 6.925 t U pro Jahr erreicht werden.

Tab. 3.19 Kennzahlen Lagerstätte Cigar Lake

Eigentümer	Cameco (50,03 %), Areva (37,1 %), Idemitsu Uranium Exploration Canada Ltd. (7,88%), TEPCO Resources Inc. (5 %)
Minentyp	Untertagebau
Entdeckung	1981
Betriebsbeginn	2014
Status	in Betrieb
Kapazität	6.900 t U pro Jahr
Reserven	82.200 t U
RAR	83.000 t U
identifizierte Ressourcen	130.000 t U
Ø Erzgehalt (identifizierte Ressourcen)	13,7% U
Gewinnungsfaktor*	98,5%

* Der Gewinnungsfaktor ist in den Angaben zu Reserven und Ressourcen bereits berücksichtigt.

Quellen: Cameco 2010b u. 2013a; OECD-NEA/IAEA 2012

Das kanadische Cigar-Lake-Projekt ist ein Beispiel für Verzögerungen durch technische Probleme, die im Bergbau und insbesondere beim Uranabbau auftreten können. Das Erzvorkommen wurde 1981 entdeckt, 1987 starteten Entwicklungsarbeiten zum Abbau des Vorkommens. Anfang 2005 begann der Bau größerer Anlagen, für 2007 war die Produktion geplant (OECD-NEA/IAEA 2010). Im April 2006 kam es zu einem ersten Wassereinbruch im damals im Bau befindlichen zweiten Zugangsschacht. Die Entwässerung des Schachtes dauerte bis April 2009 an (Cameco 2010b). Im Oktober 2006 kam es zu einem größeren Wassereinbruch unter Tage. Dies führte zur Aussetzung aller Aktivitäten in der Mine, da zunächst dieser Schaden behoben werden musste. Aufgrund eines erneuten Wassereinbruchs im August 2008 musste das Entwässern wieder pausieren. Die Entwässerung wurde im Februar 2010 abgeschlossen; 2011 wurden die unterirdischen Einrichtungen wieder instandgesetzt. Im März 2014 wurde schließlich mit der Produktion begonnen (Cameco 2014a). Die erneute Verschiebung um ein Jahr ist auf technische Schwierigkeiten beim Jet-Bore-Mining und der Weiterverarbeitung in McClean Lake zurückzuführen. Nach OECD-NEA/IAEA (2010) beliefen sich die Kosten für die Beseitigung der Schäden durch die Wassereintrüche



bis Ende 2008 schon auf etwa 275 Mio. Euro. Die geplanten Produktionskosten stiegen von 23 Euro/kg U auf 38 Euro/kg U (Cameco 2010b).

Die Verzögerung von Cigar Lake beeinflusste die erwartete kanadische (und globale) Uranproduktion stark. In den vergangenen Jahren war die Produktion des Landes eher gesunken und nicht gewachsen, was noch vor 10 Jahren erwartet wurde.

3.1.4.3 Inkai

In der Region Inkai (Kasachstan) befinden sich Vorkommen von etwa 180 kt U. Die Vorkommen verteilen sich auf die zwei Minenprojekte Inkai und Inkai South. Die Mine Inkai arbeitet seit 2009 in kommerziellem Betrieb, von 2010 bis 2012 wurden jährlich zwischen 1.600 t U und 1.700 t U produziert. Die nominelle Kapazität beträgt 2.000 t U pro Jahr, Es gibt jedoch auch schon Pläne zu weitergehenden Kapazitätserhöhungen (Cameco 2011). Inkai South begann ebenfalls Anfang 2009 mit der kommerziellen Produktion und konnte 2012 mit 1.871 t U (WNA 2013e) fast die volle Kapazität von 2.000 t U pro Jahr erreichen.

Tab. 3.20 Kennzahlen Lagerstätte Inkai (Blöcke 1 bis 3)

Eigentümer	Cameco (60%), Kazatomprom (40%)
Minentyp	ISL
Entdeckung	1979
Betriebsbeginn	2002 (Pilot); 2009 (kommerziell)
Status	in Betrieb
Kapazität	2.000 t U pro Jahr
Reserven	31.000 t U
RAR	46.000 t U
identifizierte Ressourcen	130.000 t U
Ø Erzgehalt (identifizierte Ressourcen)	0,049% U
Gewinnungsfaktor*	85%

* Der Gewinnungsfaktor ist in den Angaben zu Reserven und Ressourcen bereits berücksichtigt.

Quellen: Cameco 2010c u. 2013a; OECD-NEA/IAEA 2012



Tab. 3.21 Kennzahlen Lagerstätte Inkai South (Block 4)

Eigentümer	Uranium One (70%), Kazatomprom (30%)
Minentyp	ISL
Entdeckung	1979
Betriebsbeginn	2009
Status	in Betrieb
Kapazität	2.000 t U pro Jar
Reserven	6.900 t U
RAR	8.000 t U
identifizierte Ressourcen	23.000 t U
Ø Erzgehalt (identifizierte Ressourcen)	0,037% U
Gewinnungsfaktor*	89%

* Der Gewinnungsfaktor ist in den Angaben zu Reserven und Ressourcen bereits berücksichtigt.

Quellen: OECD-NEA/IAEA 2012; Uranium One 2012

Inkai wird von einem Joint Venture zwischen dem kanadischen Unternehmen Cameco und dem kasachischen Staatsunternehmen Kazatomprom betrieben. Cameco hält daran einen Anteil von 60%, Kazatomprom die restlichen 40%. Die Produktion findet an zwei Lagerstätten statt. Zusätzlich wird ein drittes Gebiet der Mine exploriert, um bis 2018 eine Erhöhung der Produktionszahlen zu erreichen. Die geplante Lebenszeit der Mine mit den ersten beiden Blöcken ist auf 21 Jahre angesetzt, es bestehen Lizenzen für Block 1 bis 2024 und für Block 2 bis 2030. Erträge aus dem noch nicht im Abbau befindlichen dritten Block von Inkai sollen hälftig zwischen den Partnern geteilt werden (Cameco 2011).

Beide Vorkommen zusammengenommen gehören zu den größeren kasachischen Uranlagerstätten und werden mittels ISL abgebaut. Der Urangehalt ist mit 0,049% bzw. 0,037% recht niedrig.

Da für beide Projekte Schwefelsäure als Lösungsmittel eingesetzt wird, gelten die generellen Anmerkungen wie zu Kasachstan bezüglich Knappheit an Schwefelsäure und erwarteten negativen Umweltauswirkungen gleichermaßen.

3.1.4.4 Rössing

Die Uranmine Rössing (Namibia) wird seit 1976 betrieben und bis Ende 2012 wurden insgesamt mehr als 100.000 t U produziert. 2003 erwog man, die Mine 2007 aus ökonomischen Gründen zu schließen. Dieser Plan wurde jedoch wieder geändert und durch zusätzliche Investitionen die geplante Laufzeit der Mine



bis 2021 verlängert. Eine weitere Verlängerung der Laufzeit bis 2030 wurde in Betracht gezogen (Hartman 2008).

Die Mine wird von Rössing Uranium Limited, einem Unternehmen der britisch-australischen Rio Tinto Gruppe, betrieben. Rio Tinto ist mit einem Anteil von 69 % der größte Eigentümer des Betreibers. 15 % gehören dem iranischen Staat über ein Investment Unternehmen, 3 % dem Staat Namibia, 10 % der Industrial Development Corporation of South Africa und weitere 3 % verteilen sich auf individuelle lokale Teilhaber. Die namibische Regierung hat trotz ihres geringen Eigentumsanteils ein Stimmrecht von 51 % (Rössing Uranium 2010). Die Mine arbeitet im Tagebau, die Auslaugung des Urans erfolgt nach mechanischer Zerkleinerung in Tanks. Mittlerweile ist die Mine 330 m tief (Rössing Uranium 2010).

Die Produktion für 2012 betrug nur noch 2.293 t U (Rio Tinto 2013), bei einer Kapazität von etwa 4.000 t U pro Jahr. Aktuelle Planungen enthalten aber eine Steigerung der Produktionsrate auf bis zu 5.500 t U pro Jahr, nachdem zunächst 4.500 t U pro Jahr angestrebt werden.

Aus dem Firmenbericht der Rössing Uranium (2010) geht hervor, dass in den letzten Jahren das Aufkommen des anfallenden Abfallgesteins drastisch anstieg. Während 2005 nur 7,4 Mt Abfallgestein entfernt werden mussten, waren es 2009 schon 38,8 Mt. Die Produktion stieg im selben Zeitraum nur minimal, von 3.146 t U auf 3.520 t U an. Der Verlauf der Uranproduktion und des beseitigten Abfallgesteins ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Rössing Uranium erklärte den höheren Anteil an Abfallgestein mit der notwendigen Erschließung neuer Erzkörper, die zunächst noch freigelegt werden müssten.

Aufgrund der Beteiligung Irans wird in letzter Zeit vermehrt darüber debattiert, ob dies einen Verstoß des Betreibers gegen eine Resolution des UN-Sicherheitsrats darstellt. Die Resolution verbietet den Verkauf von Beteiligungen an nuklearen Anlagen an den Iran. Es ist jedoch strittig ob dies auch für Verkäufe gilt, die vor Beschluss der Sicherheitsratsresolution abgeschlossen wurden (WISE 2011b).

In der Mine gab es in der Vergangenheit einen Diebstahl von Uran. Im September 2009 wurden Täter festgenommen und 170 kg gestohlenen Uran beschlagnahmt. Anfang 2010 forderte die US-amerikanische Global Threat Reduction Initiative aufgrund des Diebstahls Rössing Uranium auf, seine Sicherheitsmaßnahmen zu verschärfen (WISE 2011a u. 2011b).

Wie im länderspezifischen Teil beschrieben, gibt es Probleme mit der Frischwasserversorgung der Mine, ein Wasserbedarfsmanagement für die Region wäre erforderlich. Weiterhin gab es Besorgnisse in der Region über Minenabwässer, die in die Flüsse Khan und Swakop geleitet wurden (OECD-NEA/IAEA 2010).

3.1 Primäre Ressourcen



Abb. 3.6 Produktion der Rössing-Mine



Zusätzlich aufgetragen ist die Menge an angefallenem Abfallgestein.

Quelle: nach Rössing Uranium 2010

Tab. 3.22 Kennzahlen Lagerstätte Rössing

Eigentümer	Rio Tinto (68.6%) Islamische Republik Iran (15%), Südafrika (10%), Namibia (3%), andere (~ 3%)
Minentyp	Tagebau
Entdeckung	1973
Betriebsbeginn	1976
Status	in Betrieb
Kapazität	4.000 t U pro Jahr
Reserven	36.000 t U
RAR	80.900 t U
identifizierte Ressourcen	128.300 t U
Ø Erzgehalt (identifizierte Ressourcen)	0,023% U
Gewinnungsfaktor*	71,4%

* Der Gewinnungsfaktor ist in den Angaben zu Reserven und Ressourcen bereits berücksichtigt

Quellen: OECD-NEA/IAEA 2012; Rio Tinto 2013

3.1.4.5 Vaal River

Die Vaal-River-Region war in den letzten Jahren praktisch der einzige Beitrag zur südafrikanischen Uranproduktion, obwohl vom Betreiber hier Uran erst seit 2005 als mineralische Ressource betrachtet wird. Im Vaal-River-Gebiet liegen mehrere Goldminen (Great Noligwa, Kopanang, Moab Khotsong etc.). Im Anschluss an die Goldförderung kann hier das Uran abgetrennt und als Nebenprodukt gewonnen werden (Anglogold Ashanti 2013). Dies wurde historisch in drei Anlagen durchgeführt, seit den 1980er Jahren ist jedoch nur noch eine davon in Betrieb (OECD-NEA/IAEA 2012, S. 382). Daneben wird noch ein kleinerer Teil des Urans aus schon existierenden Tailings älterer Goldbergbauaktivitäten gewonnen (Anglogold Ashanti 2010a). Durch den Fokus auf die Goldgewinnung sind die Urangewinnungsfaktoren mit 45 bis 60 % dabei sehr gering.

Die Urankonzentrationen liegen, wie für die Nebenproduktion typisch, sehr niedrig: hier im Bereich 0,007 bis 0,07 %. Insgesamt werden Ressourcen von etwa 120 kt U in der Region erwartet, wovon etwa die Hälfte als Reserven ausgewiesen ist (Anglogold Ashanti 2013, S. 54). 2012 betrug die Produktion 460 t U (Anglogold Ashanti 2013), in den 3 Jahren davor lag sie zwischen 530 und 580 t U (Anglogold Ashanti 2010b, 2011 u. 2012). Eine Erweiterung der Produktion wurde bewilligt, sodass in Zukunft wieder mit einem Anstieg der Uranproduktionszahlen in der Region gerechnet werden kann.

Tab. 3.23 Kennzahlen Lagerstätte Vaal River (diverse)

Eigentümer	diverse Betreiber: AngloGold Ashanti
Minentyp	Untertagebau, Nebenprodukt zu Gold
Entdeckung	
Betriebsbeginn	1953
Status	in Betrieb
Kapazität	600 t U pro Jahr
Reserven*	62.000 t U
RAR*	109.000 t U
identifizierte Ressourcen*	120.000 t U
Erzgehalt	0,007–0,07 %
Gewinnungsfaktor*	45–60 %

* Es ist nicht ersichtlich, ob der Gewinnungsfaktor von Anglogold Ashanti berücksichtigt wurde. OECD-NEA/IAEA 2012 weisen nur 69.000 t U aus, weshalb anzunehmen ist, dass kein Gewinnungsfaktor berücksichtigt wurde.

Quellen: Anglogold Ashanti 2013; OECD-NEA/IAEA 2012



Der Betreiber der Uranabbauaktivitäten ist das südafrikanische Unternehmen AngloGold Ashanti, ein eigentlich primär auf den Goldabbau spezialisiertes Unternehmen. Die Besitzverhältnisse sind weit verteilt, größte Shareholder sind Paulson & Co Inc. (11,83%), Allan Gray Unit Trust Management Limited (10,13%). Besondere weitere Beteiligungen hält die Public Investment Corporation of South Africa (4,78%) und die Regierung Ghanas (3,11%) (Anglogold Ashanti 2010a).

3.1.5 Limitierungen und Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Minenprojekten

Das Auffinden und die quantitative Erhebung von Uranvorkommen alleine sind noch keine Garantie für die Verfügbarkeit und einen möglichen zukünftigen Abbau. Neben der schwankenden Marktlage sehen sich die Betreiber oft mit technischen, ökologischen und rechtlichen Herausforderungen, aber auch geringer öffentlicher Akzeptanz konfrontiert.

IANUS (2011) identifizierte für jede der betrachteten großen Minen eine Schwachstelle, die quasi alleine als Ursache für einen Totalausfall der jeweiligen Mine sein kann. Für Ranger sind dies die Wetterbedingungen und Regenfälle, Olympic Dam besitzt durch die Förderung untertage Produktionsflaschenhalse in den Förderschächten. Die kasachischen Minen sind alle auf eine hohe Verfügbarkeit an Schwefelsäure angewiesen. McArthur River ist von Wassereinbrüchen in die Mine massiv bedroht, Cigar Lake war schon vor Produktionsbeginn betroffen. Das vermutlich größte Risiko für Minen in Namibia ist dagegen fehlendes Wasser oder fehlender Strom. In einigen Ländern, etwa Niger, kommen noch mögliche politische Instabilitäten hinzu, aber auch in politisch als stabil geltenden Staaten kann, etwa wegen der Nutzung des Landes durch indigene Völker, kurzfristig auf politischem Weg ein Minenprojekt gestoppt werden. Diese limitierenden Aspekte sollen im Folgenden noch etwas weiter erläutert werden. Für eine umfangreiche Darstellung wird auf IANUS (2011) verwiesen.

Grundsätzlich gilt für alle Minen, die lange in Betrieb sind, dass in dem einen oder anderen Jahr mit deutlich reduzierter Produktion zu rechnen ist. In der Uranwirtschaft betraf dies verschiedene Produktionsstätten in Kasachstan (2013 und 2014), Olympic Dam (2009), McArthur River (2003 und 2008), Rössing (2007), Ranger (2006), Arlit (2004 bis 2005) und Krasnokamensk (2002). Die Ursachen hierfür sind vielfältig, wie z. B. Wassereinbrüche, defekte Förderanlagen oder Naturkatastrophen im Minengebiet. Längere Ausfälle etwa durch Streiks oder politische Instabilitäten sind hingegen eher selten, jedoch beeinträchtigen auch diese die Produktion der Minen. Eine detaillierte Analyse der einzelnen Minen zeigt viele unterschiedliche Schwierigkeiten, Risiken und Gefahren des Uranbergbaus, die jedoch nicht für alle Produktionsmethoden, Uranvorkommen oder regionale Lage einer Mine in gleicher Weise relevant sind.



Als Beispiel für technische Probleme schon bei der Errichtung wurde bereits die Mine Cigar Lake (Kap. 3.1.4.2) erwähnt, deren Inbetriebnahme sich um 7 Jahre verzögerte. Für den Abbau wird hier der Erzkörper gefroren, um den Bodenzustand zu verbessern und das Risiko eines weiteren Wassereintritts zu minimieren. Nachdem eine Schicht des Erzkörpers entfernt wurde, wird der entstandene Hohlraum mit Beton rückgefüllt, um die Stabilität des Untergrunds zu gewährleisten. Der Uranabbau benötigt jedoch nicht nur aufwendige technische Lösungen, sondern auch sehr spezifische Betriebsmittel, wie die Säuren oder Basen als Lösungsmittel beim ISL. Viele Unternehmen beschreiben die Versorgung mit Schwefelsäure als schwierige Aufgabe oder Risiko bei ihren Aktivitäten in Kasachstan (Cameco 2010a; Uranium One 2010a, Valliant et al. 2010). Dabei wurden vor allem Logistik und Transport als mögliches Problem für die Verfügbarkeit von Schwefelsäure an den Minen identifiziert. Auch die WNA (2011b) beschreibt Schwefelsäureknappheiten und verweist insbesondere auf den Ausfall einer Produktionsstätte im Jahr 2007, wodurch die Uranproduktion nicht wie geplant fortgesetzt werden konnte. Legt man einen durchschnittlichen Bedarf von 40 kg Säure pro kg U zugrunde (WNA 2013g), müssten 2012 etwa 840.000 t Schwefelsäure verbraucht worden sein (Produktion ca. 21.000 t U). Dieser hohe Materialeinsatz bedeutet auch, dass sehr große Abfallmengen zu bewältigen sind. 2008 wurden bei etwa 40 % der derzeitigen Produktion 266.600 t Abfall genutzt und neutralisiert (OECD-NEA/IAEA 2010, S. 259). 707.800 t wurden zu Drittfirmen transferiert, die diese in spezialisierte Lager- und Entsorgungseinrichtungen verbracht haben.

Für den Minenbetrieb sind außerdem in der Regel große Mengen an Wasser nötig. In einigen Regionen stehen diese aber nur bedingt zur Verfügung. Ein Beispiel dafür ist Namibia. Sowohl bei existierenden als auch geplanten Minen müssen dort erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um ihre Versorgung mit Wasser sicherzustellen (Rössing Uranium 2007). Regelmäßig kommt es schon bei den zwei aktiven Minen zu spürbaren Wasserknappheiten. Allein mit dem Betrieb der Rössing-Mine werden etwa 3 Mio. m³ Frischwasser pro Jahr verbraucht (Stand 2013, Rössing Uranium 2013, S. 14). Beispielsweise wurde 2013 die Wasserversorgung der Minen reduziert (Bloomberg 2013) und Anfang Februar 2010 musste nach einem Ausfall der Wasserversorgung bei beiden aktiven Minen für 2 Tage die Arbeit eingestellt werden. Ein ähnlicher Vorfall ereignete sich auch schon 2009 (WISE 2011a). Nach Shindondola-Mote (2009) ist der namibische Wasserversorger NamWater nicht in der Lage, alle geplanten Minenprojekte mit Wasser zu versorgen. Weitere Minenprojekte würden begleitend gebaute Entsalzungsanlagen benötigen. NamWater ist seit einigen Jahren dabei, in Kooperation mit möglichen Minenbetreibern solche Anlagen zu planen und zu bauen. Unter anderem wurden von Areva eine Meerwasserentsalzungsanlage für das Trekkopje-Projekt und für dessen Stromversorgung zusätzlich ein Dieselkraftwerk errichtet. Da die Meerwasserentsalzung



sehr energieaufwendig ist, zeigt dieses Projekt ein wesentliches Limit für den Uranabbau auf: die Notwendigkeit eines Kraftwerkbaus für den Abbau von Uran, das als Brennstoff in einem Kraftwerk dienen soll (dieser Aspekt im Detail in Kap. 4.3). Nachdem das Projekt gestoppt wurde, soll die Entsalzungsanlage nun auch Wasser für die bereits bestehenden Minen Rössing und Langer Heinrich sowie die geplante Lagerstätte Husab liefern (WISE 2013a). Bisher werden Uranminen in Namibia jedoch nicht nur mit behandeltem Meerwasser versorgt, es werden auch vorhandene, nichterneuerbare Grundwasserreserven genutzt. In einer Kooperation zwischen dem Geological Survey Namibia und der deutschen BGR empfohlen Experten beider Länder, kein Grundwasser mehr für Uranminen zu nutzen (Kraft 2010). Auch bei der australischen Mine Olympic Dam wird zur Verarbeitung des Erzes Wasser aus den Beständen des Großen Artesischen Beckens entnommen, einem sehr großen, alten Grundwasservorkommen unter der australischen Wüste.

Neben der Frischwasserzufuhr gibt es oft auch das Problem der Beseitigung von Abwasser oder von in Minen ungeplant eingedrungenem Wasser. Dazu sind in der Regel Anlagen zur Reinigung des Wassers nötig, die dem Bedarf entsprechend Kapazitäten haben müssen. Für kurzzeitig höhere Anforderungen können entsprechende Lagerbecken vorgesehen werden. Für ungeplant eingedrungenes Wasser sind zudem Pumpkapazitäten nötig, um das Wasser schnell aus den Minen zu entfernen. Es kann auch noch nach der Reinigung des Wassers Schwierigkeiten geben, falls in der Region der Mine kein entsprechendes Gewässer existiert, das die anfallenden Mengen ohne große Umweltfolgen (etwa durch Strömungen) aufnehmen kann.

Eben solche möglichen Umweltfolgen werden im Idealfall auch in den rechtlichen Regelwerken abgebildet. In nationalen/lokalen Gesetzen sind dann etwa Haftungsregelungen bei Schadensfällen sowie lokale Umweltgesetzgebungen, und oft auch entsprechende Sanktionen bei Verstößen definiert. Dementsprechend hat die lokale Gesetzgebung einen wichtigen Einfluss auf Minenprojekte. Eine wesentliche regulative Beschränkung ist dabei die verfügbare Kapazität der genehmigten Tailingfacilities, also der für die Uranförderung notwendigen Abraumhalden und Auffangbecken (z. B. in Kanada). Eine genaue Regulierung des Abraums ist insofern von Bedeutung, als in uranhaltigen Erzen neben Uran selbst noch weitere radioaktive Materialien enthalten sind, deren Radioaktivität höher ist als die des Urans selbst. Daher sind immer Vorkehrungen zum Schutz von Mensch und Natur vor Strahlung zu treffen. Diese beziehen sich zunächst auf Arbeiterinnen und Arbeiter, dann aber natürlich auch auf Unbeteiligte. Zwar gelten in allen Minen besondere Vorkehrungen zur Sicherung der Abfälle des Bergbaus, trotzdem kommt es immer wieder zu Abflüssen von radioaktiv verseuchtem Wasser, welches dann eine Gefahr für die umliegenden Gebiete und Grundwasserbestände darstellt. Zugleich werden durch den gesteigerten Uranbergbau mittels ISL Umweltgefährdungen absehbar. Es besteht die



Möglichkeit, dass die in Nähe einer Mine liegenden Grundwasserschichten durch die eingebrachten Chemikalien verseucht werden.

Kritik gibt es immer wieder an den Uranabbaupraktiken im Niger. Greenpeace und die französische Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité (CRIIRAD) haben Studien zur radioaktiven Verseuchung in den dortigen Minenregionen und -städten durchgeführt. Beide fanden gefährliche Radioaktivitätslevel, insbesondere hervorgerufen durch bei oder nach den Minenaktivitäten aufgewirbeltem Staub (CRIIRAD 2010; Dixon 2010). Veit und Srebotnjak (2010) stellten in einer für das Europäische Parlament angefertigten Studie fest, dass bedenkliche Mängel bei den Sicherheitsmaßnahmen im Umgang mit radioaktivem Material aus Minen, insbesondere beim Wohnungsbau in Niger, vorhanden sind.

Vielfach stammen die Umweltprobleme des Uranabbaus und die damit einhergehenden Akzeptanzprobleme von Altlasten, also Uranminen, in denen zur Zeit des kalten Krieges ohne Rücksicht auf Langzeitfolgen Uran geschürft wurde. Als Beispiele sind hier Sachsen (Wismut 2014), Neu Mexiko (EPA 2011) oder den Nachfolgestaaten der UdSSR in Zentralasien (Waggit 2007) genannt. Die US Environmental Protection Agency (U.S. EPA 2011) und zeitweise die Nuclear Regulatory Commission (NRC) sind aktiv, um negative Umweltfolgen der Urangewinnung der Vergangenheit besser zu dokumentieren und ihre Beseitigung zu regeln. Es geht um Beeinträchtigung von Untergrund- und Oberflächenwasser, Ablagerungen und Bodenkontaminationen. Bei einigen ISL-Minen ist umstritten, bis zu welchem Grad die Wasserqualität wiederhergestellt werden muss.

Da es in vielen Ländern spezielle Regelungen für Ureinwohner gibt, die oft Eigentumsrechte auf große Landstriche haben, sorgen gerade diese Altlasten für Opposition zu einigen neuen oder erwarteten Minenprojekten. Dies betrifft z. B. die USA und Australien, wo sich teilweise lokale Politik, Ureinwohner und Umweltgruppen geplanten Projekten entgegenstellen. Auch in Kanada ist die Erlaubnis des Uranbergbaus häufig an die Zustimmung regionaler Ureinwohnergruppen geknüpft. So hatte beispielsweise 2008 die Nunatsiavut Assembly ein 3-jähriges Abbaumoratorium im Central Mineral Belt in Labrador erlassen. Im Anschluss daran sind die Explorationen in dieser Region stark zurückgegangen.

Diese recht umfangreiche Auflistung möglicher Limitierungen und Schwierigkeiten macht deutlich, vor welchen komplexen Problemen der Versuch einer prognostischen Aussage zur zukünftigen globalen Uranproduktion eigentlich steht. Da weltweit nur eine geringe Anzahl unterschiedlicher Produktionsstätten für eine sehr große Menge der jährlichen Produktion aufkommt, birgt dies offensichtlich die Gefahr, dass schon beim Ausfall einzelner Standorte – zumindest kurzfristig – Lücken in der Produktion auftreten könnten, die nicht unbedingt durch andere Minen aufgefangen werden können.



3.1.6 Exploration

Die weitere Entwicklung der weltweiten Uranproduktion wird neben den Laufzeiten der bestehenden Produktionsstätten im Wesentlichen von neuen Projekten abhängen.

Notwendige Grundlage für die Entwicklung neuer Projekte ist die Exploration, d.h. die geologische Evaluierung der Erdkruste, die Erfassung neuer und die Reevaluation alter Lagerstätten. Grundsätzlich gilt es, zwischen Greenfields- und Brownfieldsexploration zu unterscheiden.

Erstere bezieht sich auf Exploration in Bereichen, die bislang noch nicht als erzhöflich erkannt wurden, letztere auf Gebiete, in denen bereits Erzvorkommen bekannt sind. Brownfieldsexploration findet daher regelmäßig in der Umgebung bestehender Minen statt, um für bestehende Betriebe die abgebaute Menge an Erz so weit wie möglich durch neue Reserven zu ersetzen. Ein Prozess, der über die prognostizierte Lebensdauer einer Mine gut funktioniert, aber irgendwann, sobald der Zeitpunkt der Erschöpfung der Lagerstätte näher rückt, notwendigerweise weniger erfolgreich ist. Brownfieldsexploration wird zudem außerhalb bestehender Minen in deren Umfeld mit dem Ziel betrieben, in einem bereits etablierten Vererzungsrevier bzw. -distrikt neue Erzkörper zu identifizieren. Schließlich kommt es auch zur Brownfieldsexploration im Bereich historischer (aufgegebener) Minen oder Lagerstätten mit der Erwartung, dass mit moderner Technologie in potenziell höffigen Bereichen neue Entdeckungen gemacht werden könnten. Naturgemäß wird Brownfieldsexploration eher von großen multinationalen Bergbauunternehmen betrieben, während die Junior Companies sich eher mit Greenfieldsexploration beschäftigen.

Vorweg ist es hilfreich, die historisch, langfristige Entwicklung der Explorationswirtschaft näher zu beleuchten. Diese lässt sich in drei Stadien unterteilen (Frimmel und Müller 2011a).

- > In einem ersten Stadium wird Exploration im Wesentlichen durch Prospektion an der Erdoberfläche ohne detaillierte geologische Kenntnisse betrieben. Dabei werden solche Erzkörper entdeckt, die an der Oberfläche anstehen. Die Explorationskosten sind hierbei niedrig, der technologische Aufwand gering, und gefunden werden in erster Linie hochgradige Erzkörper. Die Entdeckung von Lagerstätten am Rande des Athabascabeckens in den 1960er und 1970er Jahren, z. B. Key Lake, entsprechen diesem Stadium. In der Zwischenzeit sind die meisten Regionen der Welt bereits so gut untersucht und bekannt, dass bedeutende Neuentdeckungen dieser Art mittlerweile höchst unwahrscheinlich sind.
- > Das nächste Stadium in der Exploration stützt sich auf geologische Modelle. Durch intensive Forschung kommt es zu einem deutlich verbesserten Verständnis für die Prozesse, die für eine gegebene Vererzung verantwortlich waren. Damit können gezielter bestimmte geologische Domänen einge-



grenzt werden, in denen ein erhöhtes Potenzial für eine bestimmte Art von Vererzung gegeben sein sollte. Im Athabascabecken führten solche Erkenntnisse, gewonnen aus den oberflächennahen, im ersten Stadium entdeckten Lagerstätten, zur Ermittlung von verdeckten Erzkörpern in hundert Metern Tiefe. Hierzu zählen die großen Lagerstätten von McArthur River und Cigar Lake.

- › Sobald die modellgestützte Exploration einen gewissen Sättigungsgrad erreicht und mit den etablierten Modellen neue Lagerstätten nicht mehr in ausreichender Häufigkeit aufgefunden werden, muss die Explorationswirtschaft einen Paradigmenwechsel vollziehen. Es wird dann nach völlig neuen Ideen gesucht, nicht nur, was die geologischen Prozesse zur Konzentration eines bestimmten Rohstoffs betrifft, sondern auch hinsichtlich technologischer Neuentwicklungen zur Verarbeitung bestimmter Erztypen und somit effizienterer Gewinnungsmöglichkeiten des gesuchten Metalls aus einem bestimmten Vererzungstyp.

Für etliche Metalle (aber auch Energieträger wie Erdöl und Erdgas) hat die globale Explorationswirtschaft bereits das dritte Stadium erreicht. Auch im Fall von Uranvererzungen scheint der Paradigmenwechsel kurz bevor zu stehen, jedoch dürfte das Potenzial aus dem zweiten Stadium noch nicht völlig ausgeschöpft sein. Vieles von dem Wissen, das heute in der Exploration nach neuen Uranlagerstätten angewandt wird, stammt aus Forschungsarbeiten, die mehr als 20 Jahre zurückliegen. Hier besteht Aufholbedarf und damit die Hoffnung auf noch neue Entdeckungen durch verbesserte modellgestützte Explorationsstrategien in den kommenden Jahren. Dass in manchen Fällen das geologische Verständnis bereits sehr ausgereift ist, zeigt sich z. B. in Kanada, wo die verbleibenden Uranressourcen über die letzten 30 Jahre hinweg – trotz des hohen Investitionsvolumens in die Uranexploration – so gut wie konstant geblieben sind, oder auch in Australien, wo über die letzten 30 Jahre ebenfalls eine relativ konstante gesamte Uranressource festzustellen ist, und ein im Vergleich zu den erheblichen Explorationsausgaben der letzten 10 Jahre nur ein geringer Anstieg seit 2004 zu verzeichnen ist (Abb. 3.7).

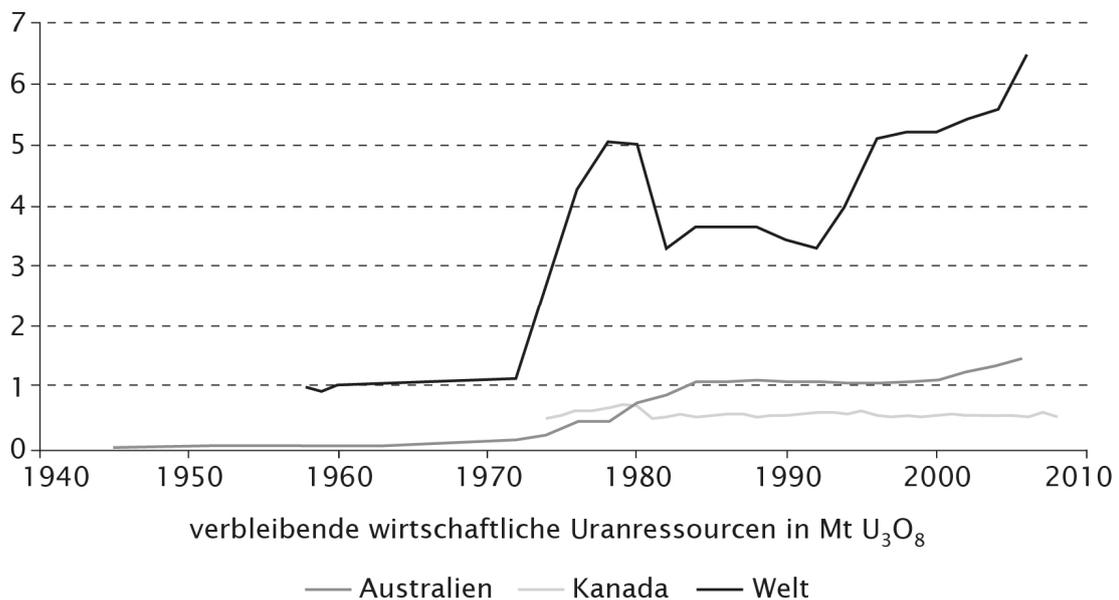
In der Abbildung 3.7 hat der Verlauf der weltweit verfügbaren Ressourcen (Welt) zwei Auffälligkeiten: einerseits einen Rückgang der Gesamtressourcen Anfang der 1980er Jahre, der sich in einer Neubewertung der US-amerikanischen Ressourcen begründet sowie der Anwendung eines neuen Klassifikationsschemas bei der OECD; andererseits ein starker Anstieg der globalen Ressourcen in den 1990er Jahren. Dieser bedeutet aber nur insofern ein Mehr an Ressourcen, als dass diese Ressourcen der UdSSR-Nachfolgestaaten erst ab diesem Zeitpunkt Berücksichtigung fanden.

Betrachtet man die Verteilung von Uran in der Erdkruste insgesamt (IANUS 2011, S. 144 ff.), so kann generell geschlossen werden, dass die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung neuer Uranvorkommen mit abnehmender Erz-



konzentration, mit abnehmender Gesamtgröße der Vorkommen und mit der Untersuchung sehr tiefer Schichten zwar zunimmt, allerdings ist damit noch wenig über technische und ökonomische Erschließbarkeit ausgesagt bzw. ab wann eventuell eine Erschließung der Ressourcen in der Energiebilanz wenig sinnvoll ist. Größere zusätzlich abbaubare Uranressourcen werden demgemäß nicht ernsthaft erwartet.¹⁷

Abb. 3.7 Entwicklung der verbleibenden wirtschaftlichen Uranressourcen in Australien, Kanada und der Welt (1940 bis 2009)



Quelle: nach Mudd/Diesendorf 2010

Deutlich wird, dass eine radikale Verbesserung der Ressourcensituation Neuentdeckungen aus dem Greenfieldsbereich bedarf. Die Entdeckung einer zweiten Lagerstätte vom Typ Olympic Dam würde z. B. schlagartig die Situation der weltweiten Uranressourcen grundlegend verändern. Das größte Potenzial liegt daher in der Exploration nach neuen IOCG-Lagerstätten. Jedoch schätzt Frimmel (2010) diese Wahrscheinlichkeit einer solchen Neuentdeckung für die nächsten 10 Jahre als sehr gering ein. Als wesentliches Argument führt Frimmel (2010) an, dass die Explorationsfirmen weltweit in den letzten Jahren bereits

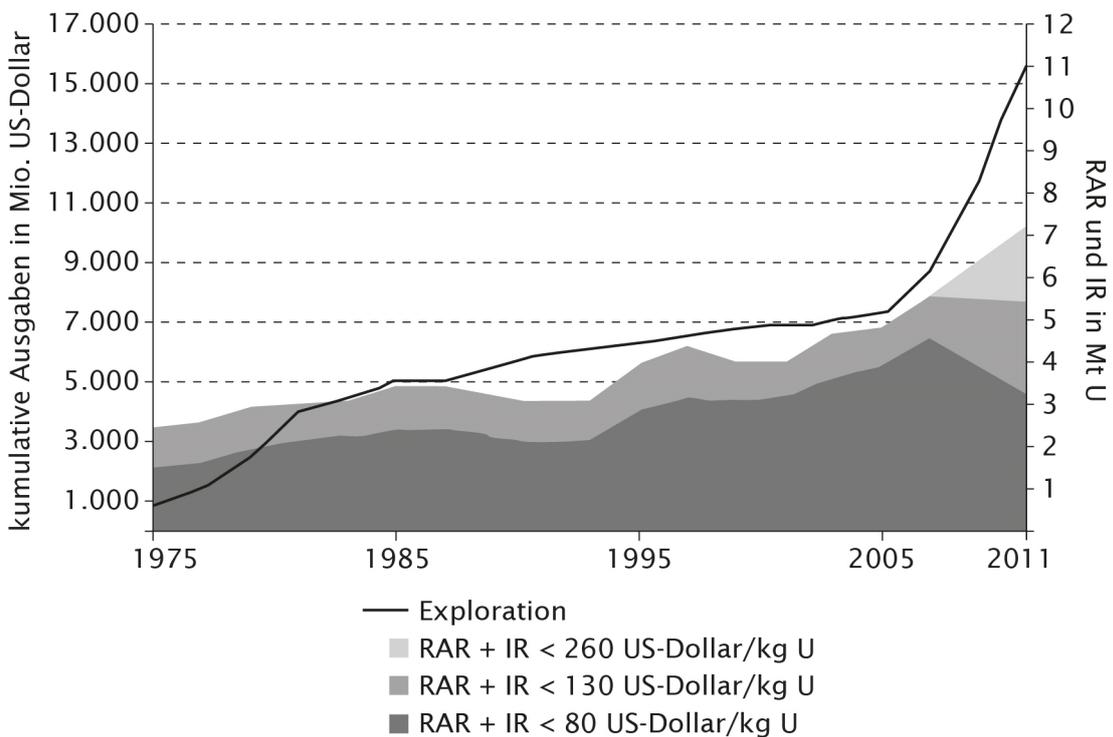
¹⁷ Es gibt aber auch Publikationen, die anderes belegen. Schneider/Sailor (2008) kommen in ihrer Übersicht über verschiedene Ressourcenmodelle zu dem überraschenden Schluss, dass die bekannten Ressourcen und die Schätzungen im Red Book der OECD-NEA/IAEA extrem konservativ sind und ein Großteil der ökonomisch sinnvoll auszubeutenden Lagerstätten noch nicht entdeckt wurde. Die verwendeten Modelle halten jedoch einer kritischen Analyse nicht Stand. Ähnlich sehen Singer/von Brevern (2010) keinen Indikator dafür, dass sich die Uranressourcen bereits einem Ende nähern.



sehr große Anstrengungen geleistet hätten, um eine weitere Lagerstätte der Art und Größe von Olympic Dam zu entdecken – bislang ohne Erfolg.

Investitionen, die in die Exploration getätigt werden, sind jedoch wesentlich für mögliche zukünftige Neuentdeckungen. Aus den Erfahrungen bei der Erschließung anderer Ressourcen wird meist auf einen direkten Zusammenhang der Explorationsausgaben mit der Entdeckung weiterer Ressourcen bei Uran geschlossen. In einer Auftragsstudie von Explorationsausgaben und bekannten Uranressourcen über die Zeit, die die WNA (2012) veröffentlichte, glaubt man augenscheinlich, eine entsprechende Tendaussage ableiten zu können (Abb. 3.8). Die Auftragsstudie der Daten durch die WNA (2012) suggeriert aber einen Zusammenhang, der so nicht existiert. Eigentlich kann nur die triviale Aussage abgeleitet werden, dass die Summe aller gefundenen Uranressourcen mit der Summe aller Explorationsaufwendungen korreliert. In welcher Weise Explorationsausgaben auch zur Neuentdeckung von Uranressourcen führen, ist daraus nicht ersichtlich. Was aus dieser Darstellung jedoch klar hervorgeht, ist die Entwicklung der Ressourcen hin zu höheren Kostenkategorien.

Abb. 3.8 Kumulative Explorationsausgaben und bekannte RAR und IR



Zwischen 2007 und 2011 zeigt sich ein deutlicher Rückgang der billigen Ressourcen. Dem steht ein immer stärkerer Anstieg der Explorationsausgaben gegenüber, die aber im Allgemeinen nur zur Umklassifizierung hin zu höheren Kostenkategorien oder Entdeckung unökonomischer Ressourcen führen.

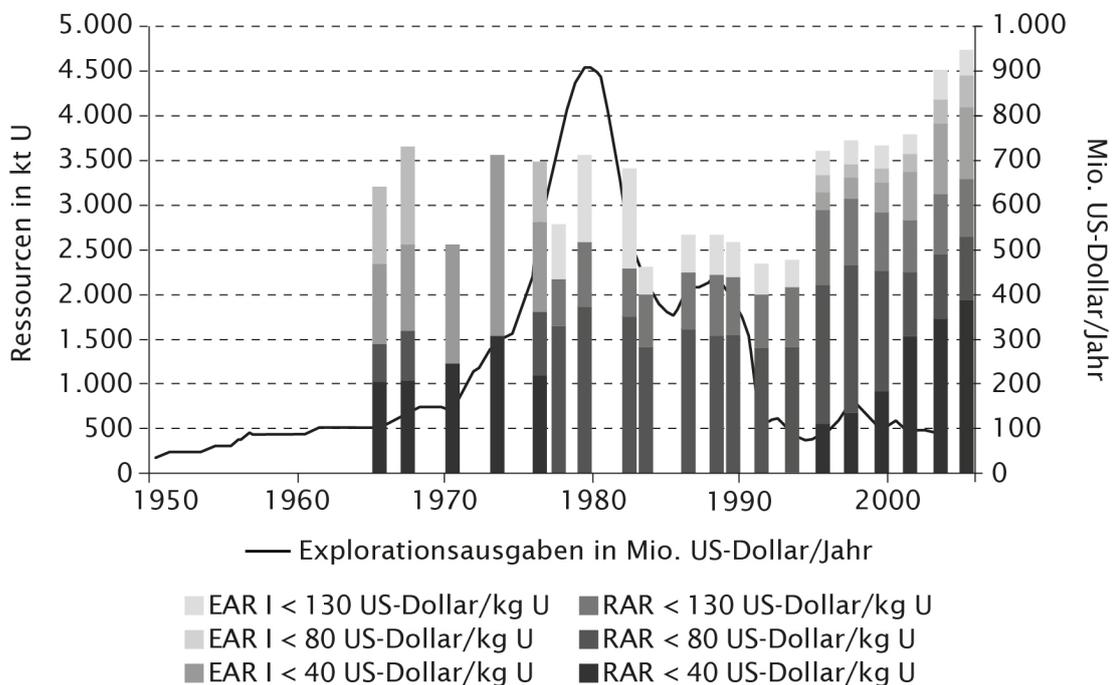
Quelle: nach WNA 2012

3.1 Primäre Ressourcen



In einer anderen Auftragung der Kenndaten (Abb. 3.9) wird jedoch sichtbar, dass der Anstieg bekannter Ressourcen keineswegs direkt auf den Anstieg der Explorationsausgaben reagiert, wie das eigentlich nach der einfachen These der direkten Korrelation zwischen Ausgaben und Funden zu erwarten wäre. Daher ziehen Zittel und Schindler (2006) den Schluss, dass es überhaupt keinen nachweislichen Zusammenhang zwischen Explorationsaufwendungen und der Entdeckung neuer Ressourcen gibt.

Abb. 3.9 Jährliche Uranexplorationsausgaben und Ressourcenabschätzungen



EAR I = voraussichtlich zusätzliche Ressourcen I (vermutete Ressourcen)
 RAR = verhältnismäßig gesicherte Ressourcen

Hier wurden die Neufunde in den verschiedenen Ressourcenkategorien im Vergleich zu den Explorationsausgaben aufgetragen. Die Abbildung aus 2006 lässt schon damals keinen Zusammenhang zwischen den jährlichen Explorationsaufwendungen und Neuentdeckung erkennen, noch vor der Einführung einer höheren Kostenkategorie und dem Einsetzen des Trends hin zu höheren Produktionskosten.

Quelle: nach Zittel/Schindler 2006, S. 26

3.1.7 Zukünftige Projekte

Im Überblick zeigt sich, dass in eigentlich allen betrachteten Ländern neue Minen oder Ausbauprojekte bestehender Minen im Gange sind. Hierzu führte Frimmel (2010) eine detaillierte Erhebung durch, die die Grundlage des folgenden Kapitels bildet.¹⁸

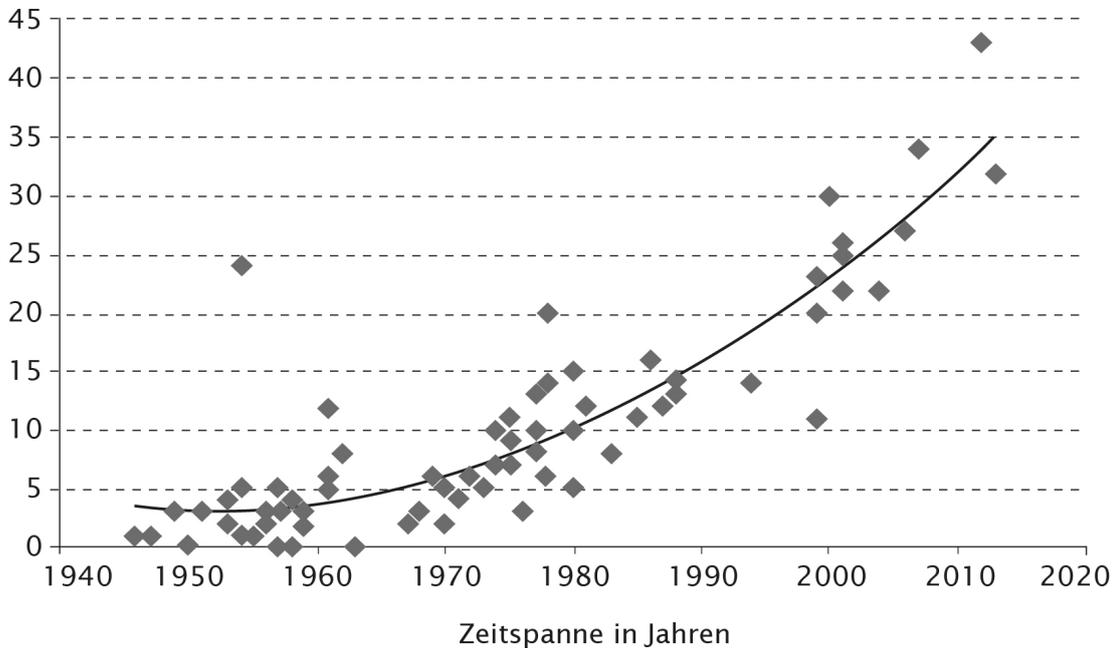
Grundsätzlich ist bei der Beurteilung der Menge an verfügbarem Uran zu bedenken, dass vom Auffinden einer Uranlagerstätte bis zur ersten Förderung von Erz eine geraume Zeitspanne vergehen kann, da jedes bergbauliche Abbauprojekt einer Reihe von Planungsphasen unterliegt. Entsprechend des Status, in dem sich die Planungen befinden, kann man vier Kategorien unterscheiden, wobei das Fortschreiten zur nächsten Phase immer vom Ergebnis der vorangegangenen Phase abhängt:

1. *Konzipierte Uranprojekte*: grundlegende Explorationsphase, d. h. räumliche Erfassung einer geochemischen Anomalie, zuerst regional, dann lokal, und Lokalisierung von auftretenden Erzmineralen;
2. *Pre-Feasibility Study*: Erfassung der Lagerstätte, d. h., durch ausgedehnte Kartierung und Bohrungen wird das dreidimensionale Ausmaß der Vererzung, falls vorhanden, festgestellt;
3. *Feasibility Study*: Quantifizierung der Metallreserven, d. h. durch detaillierte Beprobung und ein verdichtetes Bohrnetz soll die Unsicherheit bei der Abschätzung der vorhandenen Menge an Erz auf < 20 % reduziert werden. Die Mineralogie der Vererzung wird genau erfasst und Tests zur möglichen Metallgewinnung aus dem Erz durchgeführt.
4. *Errichtung einer Mine*: Sollten die Ergebnisse der Feasibility Study dazu führen, dass der gewünschte Rohstoff gewinnbringend aus den erfassten Erzkörpern gewonnen werden kann und auch alle anderen (z. B. rechtlichen) Voraussetzungen für einen Abbau geschaffen wurden, kann es zum Bau der bergbaulichen Infrastruktur (Mine, Verkehrsnetz, Energie-, Wasserversorgung etc.) kommen. In dieser Phase soll mittels weiter fortschreitender Exploration die Unsicherheit bei der Abschätzung der vorhandenen Erzmenge auf < 5 % reduziert werden.

Die Vorkommen, auf denen derzeitige Minenprojekte basieren, sind in der Regel schon länger bekannt. Tendenziell wird dabei der Zeitraum zwischen der erstmaligen Entdeckung einer Lagerstätte und dem Beginn der Abbautätigkeit immer länger (Abb. 3.10).

¹⁸ Anmerkung zur Methodik: Für die folgende Darstellung der Minenprojekte wurde die Kategorisierung nach den Entwicklungsphasen von Frimmel (2010) beibehalten, auch wenn sich in der Zwischenzeit Änderungen des Projektstatus ergeben haben. Soweit möglich wurden die angegebenen Ressourcenzahlen aktualisiert (Stand Herbst 2013). Wesentliche Änderungen (z. B. zeitliche Verschiebung der Projektfortschritte) wurden an den entsprechenden Stellen vermerkt.

Abb. 3.10 Zeitspanne zwischen der Entdeckung einer Lagerstätte und der Inbetriebnahme der Minen



Quellen: nach Arnold et al. 2011; OECD-NEA/IAEA 2006a

Gründe für die langen Zeiträume liegen in technischen Schwierigkeiten bei der detaillierten Exploration und Produktionsvorbereitung oder aufwendigen Genehmigungsverfahren. Sehr häufig spielen die mangelnde ökonomischer Attraktivität eines Standorts und Überlegungen eines Minenbetreibers hinsichtlich der tatsächlichen Nachfrage eine wesentliche Rolle. Ein zwingender Zusammenhang, dass heute mindestens 20 bis 30 Jahre verstreichen bis eine Mine eröffnet werden kann, lässt sich daraus nicht ableiten. Es gibt durchaus auch Gegenbeispiele: Die letzten kasachischen Minen wurden innerhalb von etwa 15 Jahren nach der getroffenen Entscheidung, eröffnet.¹⁹ Gleiches gilt für Imouraren (Niger) und Langer Heinrich (Namibia).

Unabhängig von geologischen Faktoren kann die Verfügbarkeit der zu gewinnenden Uranerze auch auf soziopolitischen Faktoren beruhen und damit abhängig vom jeweiligen Förderland sein.

3.1.7.1 Konzipierte Uranprojekte

In die Kategorie der konzipierten Uranprojekte fallen 170 Projekte mit Erzressourcen von 4.550 Mio. t, in denen insgesamt 2.410 kt U enthalten sind. Die Länder mit den größten Ressourcen dieser Art sind Südafrika (1.115 kt U), Russland (377 kt U), Australien (240 kt U), Kanada (170 kt U) und USA (141 kt U). Der

¹⁹ Die Entdeckung der Ressourcen hatte allerdings deutlich früher stattgefunden.



allergrößte Anteil der derzeit konzipierten einzelnen Projekte ist nur von untergeordneter Bedeutung mit gemeldeten Ressourcen unterhalb von 17 kt U²⁰. Nur 30 der aufgelisteten 170 Projekte haben mehr als 17 kt U aufzuweisen.

Darunter spielen die Witwatersrand-Goldminen in Südafrika eine herausragende Rolle. Dort liegen laut Angaben der CMSA (2008) noch enorme Uranressourcen sowohl in den goldführenden Gesteinsschichten (Quarzkonglomeraten) als auch in alten Halden der Goldbergbaubetriebe. Allein in den Halden des Free State (Welkom Goldfield) sollen rund 354 kt U liegen. Andere große Ressourcen dieser Art sind die Halden der Ezulwini-Goldmine (211 kt U), Driefontein-Goldmine (85 kt U), Kloof-Goldmine (78 kt U), die Halden von Potchefstroom (64 kt U) und der South-Deep-Goldmine (34 kt U). Auch wenn die Gesamtsumme 800 kt U entspricht, so ist äußerst ungewiss, wie viel davon als gewinnbare Ressource gelten kann, wohl eher in der Größenordnung von 150 kt U (Kap. 3.2.4).

Auch in den eigentlichen Golderzkörpern stecken noch erhebliche Mengen an Uran, wobei die größten Ressourcen in der South-Deep-Mine (44 kt U), der Driefontein-Mine (40 kt U) und der Beisa-Mine (19 kt U) liegen. Die in der Vergangenheit wiederholt produktive, derzeit aber inaktive Rietkuil-Mine, in der ein vergleichbares Quarzkonglomerat – ohne Gold – mit Uran als Hauptprodukt gefördert wurde, enthält noch beachtliche 54 kt U.

Unter den eigentlichen Uranerzlagerstätten ist jene von Elkonskoye (Elkon) in Russland die mit Abstand herausragendste. Für sie alleine wird eine Ressource von 314 kt U gemeldet. Elkonskoye ist gleichzeitig auch das teuerste Explorationsprojekt mit geschätzten Kosten von 360 Mio. US-Dollar. Das Projekt befindet sich im Status einer Pre-Feasibility Study, sodass mit einer ersten Produktion nicht vor 2020 gerechnet werden kann. Weiterhin herausragend ist mit rund 73 kt U das Vorkommen von Springbok Flats in Südafrika. Konkrete Angaben zu einem möglichen Beginn des Abbaus dieser an eine Tonsteinschicht gebundenen Vererzung liegen nicht vor. Von Bedeutung ist jedoch, dass die 0,5 m mächtige uranhaltige Tonschicht über einer 5 m mächtigen Kohleschicht liegt, sodass beim Abbau sowohl Uran als auch Kohle gewonnen werden könnten. Derzeit liegt der Fokus auf der Kohlegewinnung und der direkten Verstromung, die Urangewinnung soll zu einem späteren Zeitpunkt aufgenommen werden (Mining Weekly 2013).

Von ähnlicher Größenordnung ist das Projekt von Itataia im nordöstlichen Brasilien mit 57 kt U. Weiterhin ist die Lagerstätte von Marenica in Namibia hervorzuheben, für welche Ressourcen von rund 55 kt U angegeben werden. Den Resultaten einer ersten Studie zufolge soll dort genug Erz gesichert sein, um eine Mine über 13 Jahre betreiben zu können mit geschätzten Produktions-

20 17 kt U entsprechen 20 kg U₃O₈. Lagerstätten von geringerer Ressource haben nach Frimmel (2010) nur eine untergeordnete Bedeutung.



kosten von 84 US-Dollar/kg, einem Investitionsvolumen von 260 Mio. US-Dollar und einer Amortisationszeit von 5 Jahren.

Eine weitere größere potenzielle Lagerstätte ist jene von Yeelirie in Westaustralien. Dort stehen in oberflächennaher Position und damit relativ günstig durch Tagebau abzubauen 44 kt U zur Verfügung. Die prognostizierte Lebensdauer einer dortigen Mine, sobald gebaut, läge bei über 20 Jahren.

3.1.7.2 Projekte mit Pre-Feasibility Study

Weltweit waren 2010 39 Projekte im Stadium einer abgeschlossenen Pre-Feasibility Study. Sie beinhalten in 5.771 Mio. t Erzressourcen insgesamt 1.197 kt U. Ein Drittel davon (13 Projekte) weist Uranressourcen mit mehr als 17 kt auf und wäre damit für einen zukünftigen Uranabbau von großer Bedeutung. Die mit Abstand größte Lagerstätte ist die Uranvererzung von Viken in Schweden, wo 411 kt U als Inferred und Indicated Resources existieren sollen. Der durchschnittliche Urangehalt liegt jedoch nur bei 0,017 %. Das Uran ist an organisches Material in Schwarzschiefern gebunden, was innovativer Gewinnungsmethoden bedarf, weshalb das Viken-Projekt im Red Book (OECD-NEA/IAEA 2012) als unkonventionelle Ressource aufgefasst wird. Die Absicht ist, die sehr umfangreiche, aber niedriggradige Uranvererzung über bakteriell induzierte Auslaugung zu gewinnen – eine Methode, die aber erst zur Produktionsreife entwickelt werden muss (Kap. 2.2.5).

Das zweitgrößte Vorkommen in dieser Kategorie ist jenes von Kvanefjeld in Südgrönland, wo insgesamt 135 kt U ausgewiesen werden (OECD-NEA/IAEA 2012). Als Nebenprodukt könnte dort eine Reihe von seltenen Erden gewonnen werden und sich somit die Rentabilität dieses Vorkommens weiter verbessern. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass wegen der erhöhten Konzentration seltener Erden, Uran in ungewöhnlicher Mineralogie vorkommt, was zu Schwierigkeiten bei der Urangewinnung durch herkömmliche Methoden führt. Diese gekoppelt mit einem insgesamt nur relativ niedrigen Urangehalt von 0,025 % würden zu sehr hohen Produktionskosten führen. Dementsprechend wird dieses Vorkommen im Red Book (OECD-NEA/IAEA 2012) in die Kostenkategorie 130 bis 260 US-Dollar/kg eingestuft. Die Voruntersuchungen sollten 2015 abgeschlossen sein. Mit einem Abbau kann erst weit danach und unter wirtschaftlich günstigeren Rahmenbedingungen gerechnet werden. Die Kosten sind mit projektierten 2.295 Mio. US-Dollar enorm hoch, doch würden die bekannten Ressourcen für einen Abbauperiodenraum von mehr als 20 Jahren ausreichen.

Von ähnlicher Größenordnung ist die Expansion der Rössing-Mine im westlichen Namibia (Rössing South oder Husab-Lagerstätte). Für die dortige, granitgebundene Vererzung wurden Inferred und Indicated Resources von 140 kt U gemeldet (WNN 2010). Der durchschnittliche Urangehalt ist mit 0,038 % zwar niedrig, aber immerhin höher als in der in Produktion stehenden



Rössing-Mine. Die Produktionskosten werden mit 55 US-Dollar/kg angegeben, die Lebenserwartung der Mine mit mehr als 20 Jahren. Rössing South gilt als einer der größten Uranexplorationserfolge des letzten Jahrzehnts und ist die derzeit fünftgrößte Uranlagerstätte der Welt. Nach erfolgreich abgeschlossener Machbarkeitsstudie befindet sich die Mine in Bau. Die Produktion soll Ende 2015 beginnen (Swakop Uranium 2013) und in den nächsten Jahren zu einem der wichtigsten Uranproduzenten avancieren. Man beachte aber die an anderen Stellen benannten Herausforderungen bezüglich der Wasser- und Elektrizitätsversorgung für namibische Uranminen (Kap. 3.1.5)

Eine weitere große Ressource liegt in der Etango-Lagerstätte, ebenfalls in Namibia. Ende Oktober 2010 vorgelegte Zahlen der betreibenden Firma lassen darin rund 82 kt U vermuten, jedoch liegt der Urangehalt nur bei etwa 200 ppm. Die Vererzung ist sowohl geografisch als auch geologisch und genetisch mit jener von Rössing vergleichbar, und liegt größtenteils nicht mehr als 200 m unter der Oberfläche. Die Lebensdauer einer eventuell zu installierenden Mine wird auf ca. 18 Jahre geschätzt. Die Feasibility Study wurde mittlerweile abgeschlossen (Bannerman Resources 2012). Allerdings ist eine baldige Aufnahme der Produktion unter den derzeitigen Marktbedingungen unwahrscheinlich.

Die ebenfalls in der gleichen Region liegenden Lagerstätten von Trekkopje und Valencia sind mit Uranressourcen von 43 und 27 kt ebenfalls nennenswert, doch liegt der durchschnittliche Urangehalt mit 0,01 % noch niedriger und derzeit unterhalb der Rentabilitätsgrenze. In Trekkopje wurden in der Vergangenheit bereits 400 t U produziert, die Produktion dann aber aufgrund der zu hohen Kosten wieder eingestellt. Der Genehmigungsprozess für Valencia wurde bis 2015 aufgeschoben.

Andere größere Projekte mit einer abgeschlossenen Pre-Feasibility Study sind jene von Severinskoye in der Ukraine mit einer Uranressource von 50 kt, von Michelin in Kanada mit 36 kt, Letlhakane in Botswana mit 38 kt, Yuzhnaya im Urandistrikt Elkon in Russland mit 38 kt, und Mkuju River in Tansania mit 32 kt. Das Yuzhnaya-Projekt sollte kurz vor dem Abschluss stehen und mit voller Produktion (ca. 1 kt pro Jahr) ab 2015 gerechnet werden. Die Lebensdauer der geplanten Michelin-Mine liegt bei 17 Jahren, jene der geplanten Mkuju-River-Mine bei 12 Jahren. Das Mkuju-River-Projekt unterliegt derzeit einer Feasibility Study, wobei kalkulatorisch von Produktionskosten von 132 US-Dollar/kg während der gesamten Lebensdauer der Mine hinweg ausgegangen wird. Nach einer Verzögerung aufgrund eines 3-jährigen Moratoriums wurden die Bohrungen zur Ressourcenevaluierung wieder fortgesetzt (WNA 2013f).

3.1.7.3 Projekte mit Feasibility Study

In einem fortgeschrittenen Stadium mit abgeschlossener Feasibility Study standen 2010 insgesamt 12 Projekte. Diese Projekte umfassen insgesamt 197 Mio. t



Erzressourcen mit darin enthaltenen 220 kt Uranressourcen und haben im Mittel einen Urangehalt von 0,1%. Nur drei dieser Projekte können mehr als 17 kt Uranressourcen aufweisen. Herausragend dabei ist die Imouraren-Lagerstätte in Niger, für die eine Erzressource von 244 Mio. t mit einem U_3O_8 -Gehalt von 0,08% angegeben wird; 131 Mio. t davon gelten als nachgewiesene Reserve. Diese Lagerstätte vom Sandsteintyp kann mittels ISL kostengünstig abgebaut werden. Die Projektkosten belaufen sich auf 1.541 Mio. US-Dollar. Mit dem Beginn der Konstruktion der Mine kann ab 2014 gerechnet werden, nachdem sich bereits 2009 der Betreiber Areva (mit Minderheitsbeteiligung durch den Staat Niger) die Abbaurechte sichern konnte. Areva plant, jährlich 5 kt U_3O_8 zu produzieren mit einer prognostizierten Lebensdauer der Mine von 30 Jahren. Mit einer Produktion aus der Imouraren-Lagerstätte wird Mitte 2015 gerechnet (WNA 2013h).

Das zweite, aber deutlich kleinere Projekt ist jenes von Dornod in der nordöstlichen Mongolei. Die Lagerstätte wurde bereits früher (1988–1995) im Tagebau betrieben (insgesamt etwa 590 t Erz mit 0,085% U) und das Erz in Krasnokamensk in Russland verarbeitet, dann aber stillgelegt. Nach einer positiven Feasibility Study war geplant, die dort vermuteten Ressourcen von 27,49 Mio. t Erz mit darin enthaltenen 26 kt U über 15 Jahre hinweg ab 2012 abzubauen.²¹

Das drittgrößte Projekt dieser Kategorie betrifft die Four-Mile-Lagerstätte in Südaustralien, wo 27 kt U für die Gewinnung mittels ISL zur Verfügung stehen. Mit dem Abbau soll in Kürze begonnen werden, wobei erst einmal eine jährliche Produktion von ca. 680 t geplant ist, die beim weiteren Ausbau der Mine in den kommenden Jahren schließlich auf 2.045 t pro Jahr ausgebaut werden soll. Mitte 2013 wurde die Umweltverträglichkeit von der australischen Umweltschutzbehörde bestätigt (WNN 2013a).

3.1.7.4 Projekte im Bau

Weltweit befinden sich sieben neue Uranbergbauprojekte in einer konkreten Konstruktionsphase, vier davon können als sehr große Lagerstätten bezeichnet werden. In insgesamt 118,2 Mio. t Erzressourcen sind dabei ca. 400 kt U enthalten. Gut 40% davon liegen in der Jabiluka-Lagerstätte (North Ranger) in den Northern Territories von Australien. In dieser diskordanzgebundenen Lagerstätte sind 36,9 Mio. t Erzressourcen mit einem sehr hohen Urangehalt von 0,45% nachgewiesen, was einer Uranressource von etwa 166 kt entspricht. Die Projektkosten sind mit nur 54,7 Mio. US-Dollar vergleichsweise gering, doch dürfte der Untertageabbau relativ kostspielig sein. Die Vererzung ist bereits seit knapp einem halben Jahrhundert bekannt. Der Aufbau einer Mine war jedoch lange Zeit aus politischen Gründen nicht möglich (sie liegt inmitten des Ka-

²¹ Mit einer Produktion von Dornod ist nicht vor 2015 zu rechnen, da ein Rechtsstreit zwischen dem privaten Betreiber und der mongolischen Regierung läuft (WNA 2013g).



kadu-Nationalparks), bedingt durch vehementen Widerstand vonseiten der Mirrar Aboriginal People, der in einer 8-monatigen Blockade der Baustelle im Jahr 1998 gipfelte. 2005 wurde ein Abkommen unterzeichnet, das den Mirrar People über zukünftige Entwicklungen ein Vetorecht garantiert. Der derzeitige Besitzer Rio Tinto gab 2007 bekannt, dass die Mine wiedereröffnet werden könnte, sobald deren nur 22 km entfernte Ranger-Mine erschöpft ist. Im April 2010 wurde von der Energy Resources of Australia Ltd. (mehrheitlich im Besitz von Rio Tinto) als Betreiber klar zum Ausdruck gebracht, dass sie Jabiluka abbauen möchte. Bislang gab es aber keine Zusage vonseiten der Mirrar People, ohne die ein Abbau nicht möglich ist. Vielmehr wird von ihnen eine Eingliederung in den Kakadu-Nationalpark angestrebt.

In der Novokonstantinovskaya-Lagerstätte in der Ukraine steht eine Uranressource von 94 kt zur Verfügung. Der Abbau dieser Vererzung vom Metasomatittyp soll unter Tage erfolgen, wobei eine nominale Produktionskapazität von 1.500 t U pro Jahr mit Ausbauplänen zu 2.500 t pro Jahr angestrebt wird (OECD-NEA/IAEA 2010). Eine erste Produktion erfolgte bereits 2011, deutlich vor dem ursprünglich avisierten Zeitpunkt (2015) (WNA 2013c), 2012 wurden etwa 200 t U gefördert.

Die Projekte Kharasan 1 und 2 sowie Mynkuduk Central und Mynkuduk West in Kasachstan sind inzwischen in der Phase der kommerziellen Produktion. Sie beinhalten insgesamt 121 kt U in 319,7 Mio. t Erz.

Die übrigen beiden derzeit unter Konstruktion stehenden Minen in Australien und den USA spielen eine nur untergeordnete Rolle.

3.2 Sekundäre Ressourcen

Die Verfügbarkeit sekundärer Ressourcen wurde von IANUS (2011) im Detail ausgearbeitet und wird hier kurz zusammengefasst.

Die derzeitige Nachfrage an Kernbrennstoff wird zusätzlich zu dem bergmännisch gewonnenen Uran durch sekundäre Uranquellen befriedigt, welche die primäre Gewinnung von Uran aus der Erzförderung seit mehr als 20 Jahren ergänzen.

Zwar wurde das Uran der sekundären Quellen selbstverständlich auch ursprünglich aus Uranerz gewonnen, das Uran liegt jedoch heute in verschiedenen Formen vor, die je nach wirtschaftlichen, technischen und legislativen Rahmenbedingungen als zusätzliche mögliche Uranquellen für die zivile Nutzung als Energieträger betrachtet werden können. Es lassen sich folgende Hauptkategorien unterscheiden:

- › Sekundäre Uranquellen in verschiedenen zivilen und militärischen Beständen, wie etwa
 - Vorräte aus der Überproduktion von Uran aus dem Zeitraum bis 1990,



- hochangereichertes Uran aus den Waffenprogrammen der Nuklearwaffenstaaten.
- › Sekundäre Uranquellen in Abfallprodukten an verschiedenen Stellen der nuklearen Brennstofffertigung und Nutzung:
 - abgereichertes Uran (Tails) sowohl im zivilen als auch militärischen Bereich,
 - Uran im Abraum und Abfallprodukten von anderen Minen (Kupfer, Gold etc.),
 - Uran aus der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff.
- › Letztlich kann auch die Einsparung von Uran durch den Einsatz plutoniumhaltiger Brennstoffe (MOX) als sekundäre Ressource betrachtet werden.

Da Uran der sekundären Quellen nicht nur in verschiedenen chemischen Verbindungen, sondern auch in verschiedenen An- und Abreicherungsgraden vorliegt, werden diese Mengen zur besseren Vergleichbarkeit in Natururanäquivalente (t U*) umgerechnet.²²

3.2.1 Zivile und militärische Bestände

Vom Beginn der kommerziellen Urangewinnung bis Ende der 1980er Jahre wurde mehr Uran produziert, als in zivilen Reaktoren zur Energiegewinnung verbraucht wurde. Ein großer Teil floss vor allem in den 1950er und 1960er Jahren in die militärische Produktion von hoch angereichertem Uran (Highly enriched Uranium – HEU) für Kernwaffen und zum Betrieb von Schiffs- bzw. U-Boot-Reaktoren oder wurde zur Erzeugung von Plutonium in militärisch betriebenen Reaktoren verwendet. Im zivilen Bereich gab es zeitweise Befürchtungen, dass Uran bei einer großen Zahl an Reaktorbestellungen knapp werden könnte. So ist der Uranpreis auf dem Spotmarkt zwischen 1973 bis 1975 in die Höhe geschneilt. Der erwartete Boom der globalen Kernenergienutzung blieb aber aus. Dies führte zu einer Überproduktion an Uran in den folgenden Jahren, das als zukünftiger Vorrat für zivile Zwecke auf Halde gehalten wurde und sich zum Teil immer noch in den strategischen Reserven befindet, die in etlichen kernenergienutzenden Staaten lagern. Ab 1990 – mit Ende des Kalten Krieges und dem Zusammenbruch der ehemaligen Sowjetunion – fiel die Uranproduktion unter den zivilen Bedarf (Abb. 2.3). Seit den letzten 2 Jahrzehnten wurde ein Teil der bisherigen militärischen Bestände und der zivilen Überproduktion der Vergangenheit weltweit wieder zu Reaktorbrennstoff verarbeitet und genutzt.

Die IAEA gibt eine Abschätzung der maximalen Größe der im Prinzip vorhandenen Differenz an gesamter Produktion und dem rein zivilen Verbrauch an. Hierfür wurde die globale kumulative Gewinnung von 2.415 kt U bis 2008

²² Durch solche Umrechnung erhaltene Angaben werden durch einen Stern * an der Einheit gekennzeichnet.



dem weltweiten Verbrauch in zivilen Kernreaktoren von 1.840 kt U gegenübergestellt. Das ergibt eine Differenz von 575 kt U, die prinzipiell als eine maximale Obergrenze für möglicherweise nutzbare noch vorhandene Uranmengen betrachtet werden kann (OECD-NEA/IAEA 2010, S. 87).

Aufgrund der mangelhaften Datenlage z.B. in Bezug auf die Staaten der ehemaligen Sowjetunion, aber auch der asiatischen Staaten ist es bis heute schwierig, genau abzuschätzen, wie groß die militärischen und zivilen Anteile dieser Uranmengen sind (OECD-NEA/IAEA 2006a). Fraglich ist darüber hinaus, in welchem Anreicherungsgrad und welcher Form das Uran sich jeweils befindet und auch, ob es überhaupt für eine zivile Nutzung zugänglich ist oder sein könnte.

Betrachtet man die reinen *zivilen Vorräte*, so wurde 2009 aufgrund einer Umfrage der WNA (2009) abgeleitet, dass 154 kt U* im kommerziellen Brennstoffkreislauf vorrätig sein sollten. Dies entspricht etwas mehr als 2 Jahren Betriebszeit der derzeitigen globalen Reaktorflotte. Der Großteil dieser zivilen Bestände war in der Hand von Reaktorbetreibern (129 kt U*); davon waren 108 kt U strategische Reserven. Nur etwa 21 kt U* im zivilen Bereich stehen als nichtstrategische Vorräte möglicherweise dem Uranmarkt zur Verfügung, da verschiedene Firmen in der Brennstoffkette ihre strategischen Vorräte in den letzten Jahren eher noch weiter vermehren als abbauen. Ein weiterer Anteil von geschätzten 10 kt U* wird von Händlern und Finanzinvestoren gehalten, der prinzipiell auch verfügbar gemacht werden könnte. Eine recht gründliche Analyse der technischen Randbedingungen, unter denen die HEU-Produktion für die Kernwaffenprogramme (insbesondere in den USA und der ehemaligen Sowjetunion) vor sich ging, zeigt, dass HEU-Mengen mit einem Natururanäquivalent von mindestens 410 kt U* (wahrscheinlich etwas mehr) produziert wurden. Daraus folgt, dass zusätzliche versteckte zivile Vorräte nicht zu erwarten sind.

Der Großteil der *militärischen Bestände* liegt als HEU mit verschiedenen Anreicherungsgraden vor. Wenn Bestände an hochangereichertem Uran aus militärischen Quellen durch Vermischung mit Natururan (oder abgereichertem Uran) zu schwach angereichertem Reaktorbrennstoff (Low-enriched Uranium – LEU) verdünnt werden, kann heute ein großer Teil des Einsatzes von Natururan, der eigentlich zur LEU-Produktion nötig wäre, eingespart werden.²³

Ein Teil dieser militärischen Bestände wurde bereits zu Reaktorbrennstoff verdünnt und trug als sekundäre Ressource zur Uranversorgung ziviler Reaktoren (insbesondere in den USA) bei. Durch das »Megatons to Megawatts Program« zwischen den USA und Russland wurden von 1992 bis 2013 jährlich bis

23 Anschaulich macht dies folgendes Rechenbeispiel: Die Verdünnung von 1 t HEU (93 %) mit 27,1 t Natururan erzeugt 28,1 t LEU mit 4 % Anreicherung. Um dieselbe Menge an LEU aus Natururan anzureichern, sind 253 t Natururan bei einer Abfallmenge von 225 t mit 0,3 % Abreicherung bzw. 209 t Natururan bei einer Abfallmenge von 182 t mit 0,2 % Abreicherung nötig. Unter Abzug des zur Verdünnung von HEU verwendeten Natururans bleibt eine Natururanersparnis von 226 t bzw. 182 t pro t HEU.



zu etwa 6 bis 7 kt U* geliefert. Das Abkommen umfasste 500 t HEU entsprechend eines Natururanäquivalents von etwa 100 bis 113 kt U* (je nach Umwandlungsbedingungen, die nicht exakt bekannt sind). Die letzte Lieferung zu diesem Abkommen verließ am 21. August 2013 die russische Anlage in Zelenogorsk (WNN 2013c) und erreichte Anfang Dezember die USA (WNN 2013b). Weitere amerikanisch-russische Kontrakte ähnlichen Typs sind in absehbarer Zeit nicht zu erwarten.

Das U.S. DoE hat weitere HEU-Mengen aus eigenem Besitz zu Reaktor-brennstoff umgewandelt und dem US-amerikanischen Markt zugeführt. In naher Zukunft wird bzw. könnte weiteres Material zivil zugänglich werden. Das als Überschuss deklarierte HEU-Inventar des U.S. DoE enthielt 2008 etwa 59 kt U*. Davon werden von 2010 bis 2017 Uranbrennstoff entsprechend 21 kt U* zivil zugänglich gemacht. Etwa 2 bis 4 kt U* werden pro Jahr in den zivilen Brennstoffkreislauf eingebracht. Es ist unklar, ob nach 2017 ein ähnliches neues Programm des U.S. DoE starten wird. Vielleicht könnten bis 2030 erneut bis zu 2 kt U* jährlich zivil zugänglich werden.

Zusätzlich könnten aus den bestehenden militärischen HEU-Beständen Russlands und der USA nach den derzeitigen und geplanten vertraglich vereinbarten Abrüstungsschritten rein theoretisch weitere etwa 450 t HEU konvertiert und in den zivilen Kreislauf eingebracht werden. Dies entspräche etwa 91 bis 101 kt U* (je nach verwendetem Material zur Verdünnung des HEU: 0,25 % bzw. 0,3 % Anreicherung dieses Uranmaterials). Dieses Uran würde aber ähnlich wie beim »Megatons to Megawatts Program« nur über eine ganze Reihe von Jahren hinweg in den zivilen Markt eingebracht werden. Es gibt derzeit allerdings keinerlei Absichtserklärungen in diese Richtung.

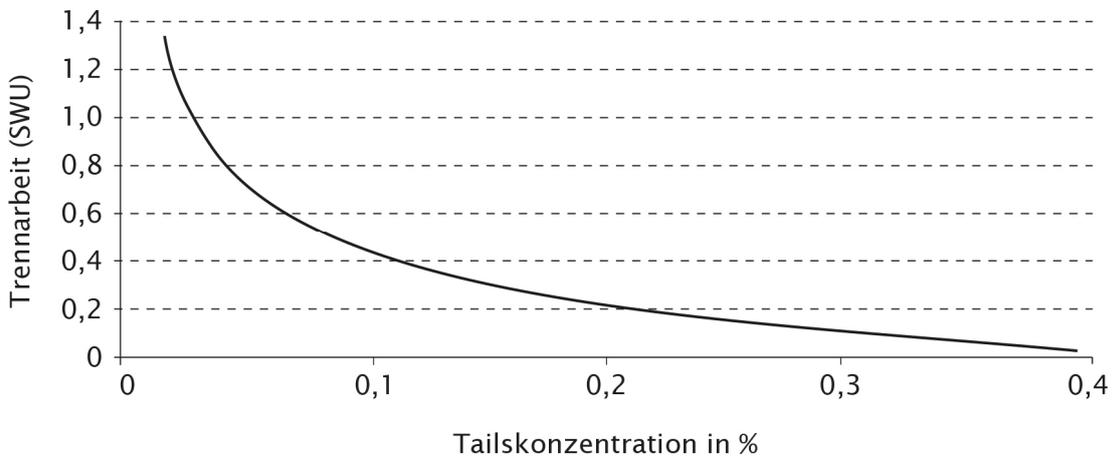
3.2.2 Wiederanreicherung abgereicherter Bestände

Im Anreicherungsprozess von Uran bleibt neben dem an U-235 angereicherten Reaktor-brennstoff, abgereichertes Uran (mit kleineren U-235-Gehalten als Natururan) als Tails zurück. Bei der Wiederanreicherung wird jenes abgereicherte Uran erneut einer Anreicherungsanlage zugeführt, um es nochmals anzureichern. In einigen Tails aus vergangener Anreicherung stecken noch U-235-Gehalte von bis zu 0,4% (zumeist ist der Abreicherungsgrad aber kleiner). Die Nutzbarkeit von abgereichertem Uran wird hauptsächlich durch drei Faktoren bestimmt: der Verfügbarkeit von Anreicherungsanlagen, den Kosten der Wiederanreicherung sowie der Zugänglichkeit des abgereicherten Urans in einer für die Wiederanreicherung brauchbaren Form. Besonders ist darauf hinzuweisen, dass die Anreicherungsarbeit (Separative Work Unit – SWU) mit abnehmendem U-235-Gehalt des eingesetzten (alten abgereicherten) Materials nicht linear zunimmt. Abbildung 3.11 zeigt exemplarisch den Fall des Anreicherungsbedarfs bei der Wiederanreicherung von abgereichertem Uran einer U-235-



Konzentration von 0,4 % (Feed) auf eine Produktkonzentration von 0,71 % (entsprechend Natururan) bei verschiedenen gewählten Konzentrationen der Tails dieser erneuten Anreicherung.

Abb. 3.11 Anreicherungsaufwand in SWU für eine Wiederanreicherung auf 0,71 % bezogen auf eine Einheit Uranfeed abgereicherten Urans mit 0,4 % U-235-Gehalt, aufgetragen über die erreichte Abreicherung des neuen Abfallstroms



Beispiel: Bei einem Uranfeed von 1 kg 0,4% U wird bei einer Produkthanreicherung von 0,711% und einer Tailsabreicherung von 0,2% ein Bedarf von 0,2 kg SWU benötigt.

Quelle: nach IANUS 2011

Dieser wesentliche Zusammenhang bedeutet auch: Die für diese Wiederanreicherung von alten Abfällen der Anreicherung der Vergangenheit notwendige Anreicherungs-kapazität steigt nicht linear mit sinkender alter Tailskonzentration an. Die Wiederanreicherung von Tailshalden mit U-235-Konzentrationen von 0,2 bis 0,3 % ist daher aus ökonomischen und energetischen Gründen äußerst unwahrscheinlich.

Bisher lagen nur wenige Beispiele praktizierter Wiederanreicherung vor. In einer ungewöhnlichen Konstellation von Interessenlagen wurde von 1999 bis 2010 europäisches abgereichertes Uran in Russland wiederangereichert,²⁴ wofür etwa ein Drittel der gesamten russischen Anreicherungs-kapazität eingesetzt

24 Russland wollte und konnte ansonsten brachliegende Anreicherungs-kapazität nutzen und dabei erzeugtes LEU (1,5 %) für die HEU-Verdünnung im »Megatons to Megawatts Program« verwenden. Die europäischen Anreicherungs-firmen URENCO Ltd. und EURODIF wollten Abfallbeseitigungskosten für Tailings aus ihren Anreicherungs-kampagnen einsparen. Russland verbesserte sogar die Zielabreicherung über das vereinbarte Maß (etwa 0,21 %) hinaus und konnte damit den eigenen nationalen Uranbedarf etwas minimieren (Diehl 2004).



wurde. Die europäischen Abnehmer erhielten angereichertes Uran in der Größenordnung von etwa 1 kt U* pro Jahr.

Die Wiederanreicherung hat rein theoretisch ein sehr hohes Potenzial, betrachtet man die maximal ausbeutbaren Bestände von knapp 2.000 kt abgereicherten Urans. Dies entspräche grob einer Größenordnung von etwa 500 kt U*. Wie zuvor angedeutet, ist die Wiederanreicherung aber sehr aufwendig und tatsächliche Programme wären höchst abhängig von den aktuellen Natururan- und den Anreicherungspreisen und der Verfügbarkeit von billigen Anreicherungskapazitäten sowie von der noch verbliebenen Urankonzentration in den Tails aus der Anreicherungsaktivitäten der Vergangenheit. Derzeit (2013) sind zwar Überschüsse in den Kapazitäten vorhanden, aber der Uranpreis ist eher niedrig. Die vorhandenen Anreicherungskapazitäten werden daher (sinnvoller) für die Anreicherung von Natururan bis zu niedrig konzentrierten Tails (0,25 oder 0,2%) verwendet.

Begrenzte Bemühungen zur Wiederanreicherung könnten aber vielleicht in den nächsten Jahren in einer Größenordnung bis zu 0,5 kt U* pro Jahr stattfinden. Eventuell wäre nach 2016 eine Ausweitung auf bis zu 2 kt U* pro Jahr denkbar, falls die laufende Erweiterung von bestehenden Anreicherungskapazitäten dies zulässt und sich der Aufwand für die Betreiber rechnet.

3.2.3 Uran aus der Wiederaufarbeitung und Ersparnis durch MOX-Nutzung

Der größte Teil der beim Betrieb von Kernkraftwerken anfallenden, abgebrannten Brennelemente wird weltweit gelagert und soll schlussendlich einer Endlagerstätte zugeführt werden. Mehrere 10.000 t abgebrannter Brennstoff wurde aber auch in Wiederaufarbeitungsanlagen behandelt. Dabei fallen nicht nur die abgetrennten Spaltprodukte und Plutonium an, sondern auch größere Mengen an wiederaufgearbeitetem Uran (WA-U), das für den erneuten Reaktoreinsatz wiederverwendet werden könnte.

Da WA-U chemische Verunreinigungen und eine ungünstig veränderte Isotopenzusammensetzung (z. B. einen Anteil von U-236) besitzt, müssen für den Betrieb in Leichtwasserreaktoren einige technische, aber vor allem genehmigungsseitige Besonderheiten beachtet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung von WA-U als Matrix bei der Produktion und Verwendung von MOX. Verschiedene Reaktoranwendungen von WA-U wurden in einer Reihe von Ländern bereits durchgeführt. Der Reaktorbetrieb konnte weitgehend unter ähnlichen Bedingungen wie bei üblichem Brennstoff aus angereichertem Natururan erfolgen. Betriebliche Unterschiede bestehen jedoch unter anderem durch den erforderlichen höheren Grad der Urananreicherung, durch den Gehalt an U-236 (reduziert die mögliche Verweildauer des Brennelements im Reaktor, die für heute gewünschte Hochabbrände des Brennstoffs nötig ist)



sowie durch die erhöhte Nachzerfallswärme bestrahlter Brennelemente (Extraktionskosten bei der Endlagerung – ähnlich wie bei MOX). Das Interesse von Reaktorbetreibern, WA-U zu nutzen, ist dementsprechend gering.

Das prinzipielle Potenzial an bisher angefallenem Uran aus der Wiederaufarbeitung ist mit etwa 70 kt U* (WNA 2009) nicht unattraktiv. Allerdings wird in der Praxis kaum etwas von diesem WA-Uran tatsächlich wieder genutzt. Derzeit werden nur 2 bis 2,5 kt U* pro Jahr wiederverwendet und die IAEA geht davon aus, dass sich daran zumindest bis 2025 wenig ändern wird.

Das theoretische Potenzial der Natururanersparnis durch die Nutzung von bereits abgetrenntem Plutonium als Spaltstoff in MOX-Brennstoff liegt für die Summe der militärisch und zivil erzeugten Bestände (je etwa 250 t) bei etwa 80 kt U*. Im zivilen Bereich findet die MOX-Nutzung – insbesondere wegen ihrer betriebswirtschaftlichen Unattraktivität – nur in einer Größenordnung der Natururanersparnis von 1 kt U* pro Jahr statt. Vor Fukushima gab es japanische Pläne, die MOX-Nutzung auszuweiten, was IANUS (2011) für die Potenziale sekundärer Uranressourcen noch berücksichtigte. Nach einer US-amerikanisch-russischen Vereinbarung sollen zwischen 2017 und 2025/2026 insgesamt 34 t Waffenplutonium als MOX in Reaktoren eingesetzt werden. Die dadurch erzielte jährliche Natururanersparnis wird etwas unterhalb von 1 kt U* liegen. Allerdings ist unklar, ob das Programm wie geplant durchgeführt wird (Diakov/Rybachenkov 2013). Für den Vergleich mit Uranbedarfswerten der IAEA (z. B. OECD-NEA/IAEA 2012, S. 76) muss noch angemerkt werden, dass dort die Nutzung von MOX gar keinen Eingang findet.

3.2.4 Uran aus Tailings

Als Tailings werden allgemein Abfallprodukte bezeichnet, die bei der Gewinnung von Metallen anfallen. Für die Uranversorgung können insbesondere die Abraumhalden der Gold- und Kupferproduktion (möglicherweise auch von manchen Kohleminen) von Interesse sein. Hier ist vielfach Uran als weiteres Metall im Erz vorhanden, wurde jedoch in der Vergangenheit aufgrund der niedrigen Konzentrationen und der schlechten Rentabilität nicht aus dem Gestein extrahiert. Es ist sehr schwer einzuschätzen, welche noch realistisch ausbeutbaren Uranmengen in Abraumhalden vorliegen und mit welchen jeweils angepassten Technologien eine genügend effiziente und nicht zu teure Extraktion zukünftig möglich wäre.

Bekannt ist, dass sich signifikante Mengen an Uran vor allem in den großen Abraumhalden der südafrikanischen Goldminen finden. Angaben der südafrikanischen Chamber of Mines (CMSA 2008) zufolge sollen darin 800 kt U liegen. Demgegenüber wurde von IANUS (2011) eine ganze Reihe von Firmenberichten zu diesem Thema ausgewertet. Es ergab sich als Summe der darin genannten Abschätzungen: 70,5 kt gemessene, 82 kt angegebene und 12 kt vermutete Res-



sourcen. Mittel- bis langfristig, bei deutlich höheren Uranpreisen und der Entwicklung innovativer Abbaumethoden – eventuell mikrobieller Natur – könnten diese Ressourcen einen Beitrag zur globalen Uranversorgung leisten.

Basierend auf den derzeit durchgeführten und geplanten Projekten geht die IAEA (OECD-NEA/IAEA (2010) realistischer Weise allerdings von einem Potenzial von lediglich mehreren hundert t pro Jahr für die Gewinnung von Uran aus den Abraumhalden von Gold(- und Kohle)minen in Südafrika aus. Möglicherweise kann in Zukunft doch mit 1 bis 2 kt U aus dieser Quelle gerechnet werden.²⁵

3.2.5 Überblick zur zukünftigen Verfügbarkeit sekundärer Ressourcen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die sekundären Uranressourcen zwar ein hohes theoretisches Potenzial haben, aber das realistisch erwartbare Potenzial – zumindest für die beiden nächsten Jahrzehnte – ist nur ein Bruchteil dieser Mengen. Die sekundären Ressourcen werden weiterhin eine ergänzende Rolle spielen. Der weltweite Bedarf muss jedoch nach wie vor in der Hauptsache aus Minen gedeckt werden. Die Verfügbarkeit der sekundären Ressourcen wird ab etwa 2014 auf die Hälfte des Stands von 2010 zurückgehen und eventuell noch weiter sinken. Sie könnte aber auch nach und nach wieder ansteigen bis auf den Stand von 2010.

Die zukünftige Nutzung sekundärer Uranquellen ist dabei auch maßgeblich von den ökonomischen Rahmenbedingungen abhängig. Für eine belastbare Prognose müssten somit unter anderem die realen Preise für Natururan und nutzbare Anreicherungskapazität bekannt und vorhergesagt werden, denn diese sind entscheidend dafür, ob und welches Uran etwa aus der Wiederanreicherung ökonomisch nutzbar ist. Hinzu kommen Handelsbeschränkungen und technische Faktoren, die Zugänglichkeit des Materials und im Falle der Verwendung militärischer HEU-Bestände, nationalstaatliche und sicherheitspolitische Erwägungen. Eine Einschätzung der zukünftigen Verfügbarkeit sekundärer Uranressourcen wurde von IANUS (2011) vorgenommen. Hierbei wurden die jeweils minimal und maximal zu erwartenden Mengen für die verschiedenen Herkunftsquellen von Uran abgeschätzt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Abbildung 3.12. Die Wiederanreicherung und die zusätzliche Bereitstellung von Uran aus militärischen Beständen wurden dabei als unwahrscheinlich angenommen.

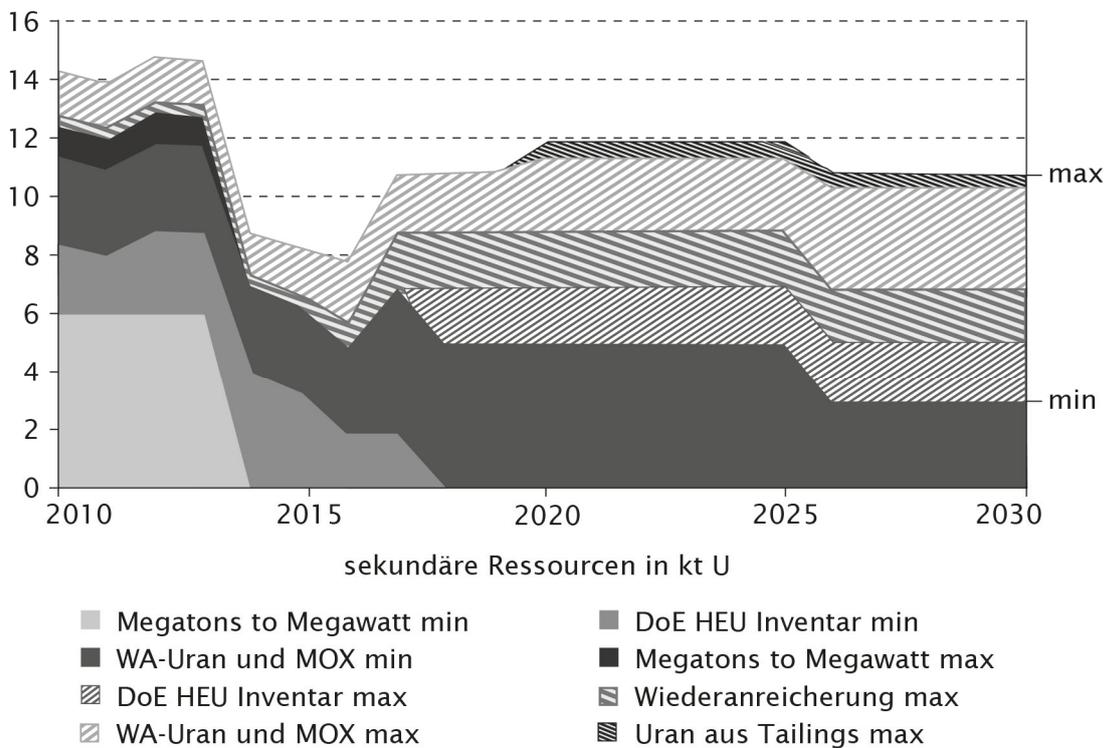
Sicher scheint, dass die Bedeutung sekundärer Ressourcen für den Uranmarkt nach Auslaufen des russisch-US-amerikanischen Abkommens (»Mega-

25 Dies wurde von IANUS (2011) bereits bei der Zukunftserwartung hinsichtlich wesentlicher südafrikanischer Minen – im Rahmen der Prognose für 29 repräsentative Minen und Minenprojekte weltweit – berücksichtigt (Kap. 3.2.5) und wirkt sich daher nicht auf die hier betrachteten zusätzlichen sekundären Uranressourcen aus.



tons to Megawatts Program«) 2013 sinken wird. Sollte der unwahrscheinliche Fall eintreten, dass Russland oder die USA doch noch weitere größere militärische HEU-Mengen dem zivilen Markt zuführen, könnte mit einer gewissen Vorlaufzeit die jährliche Rate von 6 bis 7 kt U*, die durch das »Megatons to Megawatts Program« bis 2013 maximal geliefert wurden, wieder erreicht werden. Die nichtstrategischen kommerziellen und vom Finanzsektor gehaltenen Vorräte von etwa 30 kt U* könnten über einen Zeitraum von einigen Jahren zugänglich gemacht werden.

Abb. 3.12 Überblick über die bis 2030 verfügbaren sekundären Ressourcen



Eigene Darstellung nach IANUS 2011, S. 166

4 Ausblick und Zukunft

Im letzten Jahrzehnt gab es im öffentlichen und politischen Raum wiederholt Diskussionen über eine mögliche bzw. bevorstehende Renaissance der Kernenergie. Konkrete Planungen hinsichtlich eines Ausbaus der Kernenergie existieren insbesondere in asiatischen Ländern. Da Kernkraftwerke heute üblicher Weise für eine Betriebszeit von 40 bis zu 60 Jahren ausgelegt werden, ist die Verfügbarkeit des Brennstoffs mindestens über einen vergleichbaren Zeitraum von entscheidender Bedeutung für deren Rentabilität und deren Beitrag zur Stromversorgung. Es ist davon auszugehen, dass auch in den nächsten Dekaden als Brennstoff hauptsächlich Uran eingesetzt werden wird.²⁶

In Reaktion darauf wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Reichweiten- und Verfügbarkeitszenarien für Uran erstellt. Diese unterscheiden sich in ihren Randbedingung und Grundannahmen wie

- > den bekannten oder erwarteten Größen von Vorkommen,
- > den aktuellen und zukünftigen Produktionsmengen, insbesondere unter Berücksichtigung der aktuellen Marktlage und der langen Vorlaufzeiten bei der Inbetriebnahme,
- > dem zukünftigen Bedarf,
- > der betrachteten Zeitspanne,
- > der Berücksichtigung primärer und auch sekundärer Ressourcen,
- > dem Einfluss von unkonventionellem Uran und Uran als Nebenprodukt,
- > dem erwarteten Energie- und Kostenaufwand,
- > sowie verschiedener weiterer sozioökonomischer Einflussfaktoren.

Je detaillierter diese Faktoren in ein Szenario zur zukünftigen Uranversorgung einfließen, desto zuverlässiger kann ein Bild der kurz- und langfristigen Verfügbarkeit von Uran im Allgemeinen entworfen werden.

An dieser Stelle soll auch auf die verschiedentlich stattfindende Instrumentalisierung von Aussagen zur Uranreichweite hingewiesen werden, bei der sich teils ungewöhnliche Allianzen bilden können. Vertreter einer eher positiven Sicht auf die Nutzung von Nuklearenergie neigen dazu, zu betonen, dass Uran eine nahezu unerschöpfliche Ressource ist. Ist man jedoch an der Nutzung von Plutonium effektiv erzeugenden und nutzenden Reaktoren interessiert, wird die Uranknappheit ein gutes Argument für den Einstieg in die Plutoniumtechnologie. Vonseiten der Kernenergieskeptiker wird die Ressourcenknappheit vor allem im Hinblick auf die Kritik am Neubau von Reaktoren mit Laufzeiten von 40 bis 60 Jahren als schwerwiegendes Argument ins Feld geführt. Ist man jedoch

²⁶ Reaktordesigns mit alternativen Brennstoffen (z. B. Thorium, Plutonium) werden unter der Bezeichnung Generation IV erforscht und entwickelt und sollen ab 2030 einsetzbar sein, wahrscheinlich eher deutlich später, wenn überhaupt (Sholly 2013). Im vorliegenden Diskussionspapier werden solche Optionen jedoch nicht berücksichtigt.

wegen der Plutoniumwirtschaft und der damit verbundenen erheblichen Proliferationsrisiken besorgt, dann erscheint die Argumentation günstig, dass die Uranressourcen noch sehr weit reichen.

4.1 Theoretische und langfristige Verfügbarkeit

Unabhängig von der tatsächlichen Verfügbarkeit der derzeit identifizierten Ressourcen und der Marktentwicklung lassen sich ein paar hypothetische Überlegungen zur Reichweite der bekannten Uranressourcen anstellen.

Der einfachste Ansatz ist, den derzeitigen Stand der Ressourcen heranzuziehen und einen global gleichbleibenden Verbrauch anzunehmen. Mit den Daten aus den vergangen beiden Red-Book-Ausgaben (OECD-NEA/IAEA 2010 u. 2012) ergeben sich damit theoretische Reichweiten von etwas mehr als 100 Jahren. Mit der von Frimmel (2010) ermittelten Gesamtressource (Kap. 3.1.2) würde sich eine Reichweite von 141 Jahren ergeben.

Für eine verlässliche Prognose zur Verfügbarkeit von Uran eignet sich eine solche Rechnung jedoch nicht. Einerseits wird in solchen Szenarien die mögliche Neuentdeckung von Ressourcen ausgeklammert, andererseits steht hinter dieser Überlegung, dass alle derzeit ausgewiesenen Ressourcen auch wirklich gefördert werden können. Vor allem ist aber ein gleichbleibender Bedarf an Uran als Brennstoff in den kommenden Jahrzehnten aufgrund der Ausbaupläne in Asien unwahrscheinlich. Letztendlich setzt ein solches Versorgungsszenario voraus, dass das Uran auch immer dann gefördert werden kann, wenn es gerade benötigt wird, d. h., dass zu jedem Zeitpunkt auch genügend Minen in Betrieb sind. Deren Kapazität lässt sich jedoch nicht beliebig steigern. Warum diese Voraussetzung problematisch ist, lässt sich am Beispiel von Olympic Dam zeigen. Dort steht eine Ressource von 900 kt U einer durchschnittlichen Produktion von 3.200 t U in den letzten 10 Jahren gegenüber. Bei dieser Abbaurate würde es demnach 280 Jahre dauern, um das gesamte Uran zu fördern, auch könnten damit 20 % der weltweiten Ressourcen nur über diesen extrem langen Zeitraum verfügbar gemacht werden.

Dass eine solche Prognose zur Verfügbarkeit von Uran als wenig brauchbar zu betrachten ist, ergibt sich also schon daraus, dass nur zwei Faktoren darin einfließen, die Menge der Vorräte und der Bedarf, und das als Konstante. Für eine differenziertere Betrachtung setzte IANUS (2011, S. 139 ff.) drei Bedarfs-szenarien mit zwei verschiedenen Ressourcenmengen in Bezug. Bei zwei der als rein hypothetisch einzuschätzenden Bedarfs-szenarien wird von einem massiven oder sehr massiven globalen Ausbau der Kernenergie ausgegangen, der entsprechend der Propagierung einer *nuklearen Renaissance* einen wirklich signifikanten nuklearen Beitrag zur Lösung des Klimaproblems bewirken soll.²⁷ Versor-

²⁷ Der nukleare Anteil der globalen Primärenergienachfrage liegt heute bei lediglich 5 %.



gungsseitig wurden – in Anlehnung an die Zahlenwerke der Red Books der OECD-NEA/IAEA – eine relativ gesicherte *Ressourcenmenge A* an identifizierten Ressourcen von 6 Mio. t U und eine zusätzliche, unsicherere bzw. spekulative *Ressourcenmenge B* von 10 Mio. t U, die noch unentdeckte Ressourcen umfasst, angenommen.

Vergleicht man diese Ressourcen mit dem derzeitigen Bedarf (Szenario »Fortschreibung«), so könnte, wenn tatsächlich alle heute bekannten und vermuteten Uranressourcen technisch und wirtschaftlich ausbeutbar wären, von einer Reichweite von grob 2 Jahrhunderten ausgegangen werden. Wenn nur die heute als bereits identifiziert geltenden Uranressourcen betrachtet werden, reduziert sich dieser Horizont auf etwa 85 Jahre. Die RAR in der Produktionskostenkategorie < 130 US-Dollar/kg U wären bereits nach etwa 50 Jahren erschöpft.

In einem zweiten Szenario (Szenario »massiver Ausbau«) wird ein globales lineares Wachstum der Kernenergie mit Vervierfachung der nuklearen Kapazität bis 2050 angenommen, sodass dann ein Drittel des Stroms²⁸ aus Kernreaktoren bereitgestellt werden würde. Bis 2050 wäre dann die Ressourcenmenge A aufgebraucht. Für jedes weitere Jahrzehnt Reaktorbetrieb würde – bei Konstanthalten der Kapazität – danach ein Bedarf von knapp 3 Mio. t U zu decken sein, was mehr wäre als die seit Beginn des Nuklearzeitalters bis 2010 weltweit eingesetzte Uranmenge. Angesichts dessen würden auch die unentdeckten und spekulativen Uranmengen B (von denen gar nicht klar ist, ob sie jemals wirklich bergmännisch abgebaut werden könnten) deutlich vor Ende des 21. Jahrhunderts verbraucht sein.

Zuletzt betrachtete IANUS (2011) noch einen Ausbau der Kernenergie auf 50 % der Stromerzeugung bis 2070 (Szenario »sehr massiver Ausbau« mit Verzehnfachung der nuklearen Kapazität bis 2070). Dabei würden alle heute bekannten identifizierten Ressourcen (Ressourcenmenge A) schon vor 2040 aufgezehrt sein. Ein Weiterbetrieb der dann laufenden Reaktorflotte (Konstanthalten der ausgebauten Kapazität) würde pro Jahrzehnt über 4 Mio. t U benötigen, sodass auch die spekulativen Uranmengen B innerhalb von etwa 2 Jahrzehnten aufgebraucht wären. Das Ausbauziel 2070 wäre demnach nicht erreichbar, da alle – auch sämtliche heute rein spekulativ angenommenen – Uranressourcen bereits zuvor aufgezehrt werden würden. Ein relevanter nuklearer Beitrag zur Lösung der Klimaproblematik könnte in einem massiven oder sehr massiven Ausbau der Kernenergie gesehen werden, aber es ist ersichtlich, dass solche Szenarien wegen des enormen Uranbedarfs, der nicht gedeckt werden kann, gänzlich unrealistisch bzw. nicht umsetzbar wären.

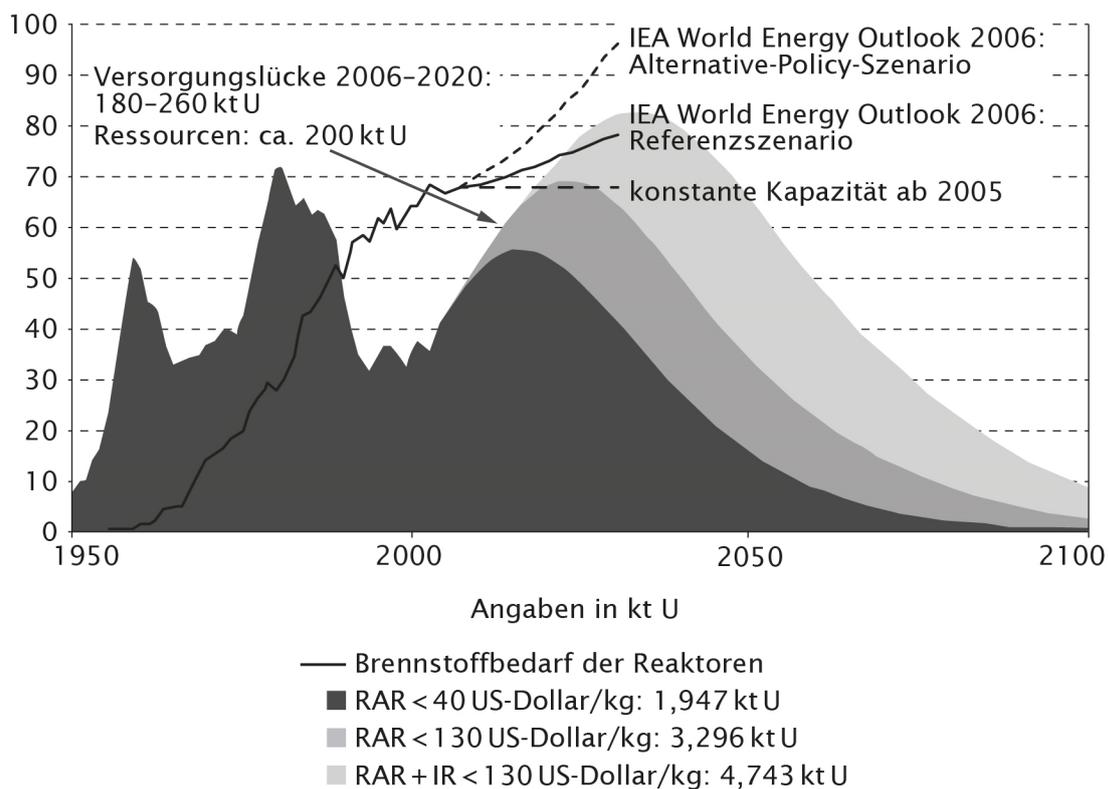
Eine etwas komplexere Betrachtung der langfristigen Uranversorgung tätigten Zittel und Schindler (2006). Die Autoren stützten sich hierbei auf die Res-

28 Im Vergleich dazu werden heute weltweit etwa 11 % des Stroms durch Kernenergie bereitgestellt.



sourcesklassifizierung der IAEA und die Ressourcenangaben aus dem Red Book 2005 (OECD-NEA/IAEA 2006b) (Abb. 4.1). In der Darstellung sind die zu der Zeit ausgewiesenen Ressourcen verschiedener Kostenkategorien in Relation zu verschiedenen Bedarfsszenarien gesetzt. Die Produktion wurde dabei mittels eines nach Hubbert mathematischen Modells abgeschätzt. Insbesondere für massive Ausbauszenarien zeigt sich dabei langfristig ein Uranmangel an, wenngleich hier keine zusätzlichen unentdeckten Ressourcen berücksichtigt werden. Als wesentlicher Aspekt ist dabei auch auf die Abhängigkeit von den endlichen sekundären Ressourcen hingewiesen. Es wurde gefolgert, dass schon zwischen 2015 und 2030 ein Versorgungsengpass entstehen könnte, wenn die Lagerbestände aufgebraucht sind und die Primärproduktion nicht rechtzeitig angehoben werden kann.

Abb. 4.1 Geschichte und Prognose der Uranproduktion



Quelle: nach Zittel/Schindler 2006



4.2 Kurz- und mittelfristige Uranverfügbarkeit (bis 2030/2035)

Neben der grundsätzlichen (langfristigen) Verfügbarkeit von Uran wurde in den vergangenen Jahren auch die kurz- und mittelfristige Verfügbarkeit thematisiert. Dies geschah vor dem Hintergrund des international erwarteten Wachstums der Kernenergie und der gegenwärtigen Diskrepanz von Uranbedarf und -produktion.

Auch Frimmel (2010) und IANUS (2011) stellten entsprechende Überlegungen an, wenngleich sich die Ansätze unterscheiden. Im Folgenden werden diese überblicksartig diskutiert und mit anderen Arbeiten zu diesem Thema verglichen.

Verfügbarkeitsszenario nach Frimmel

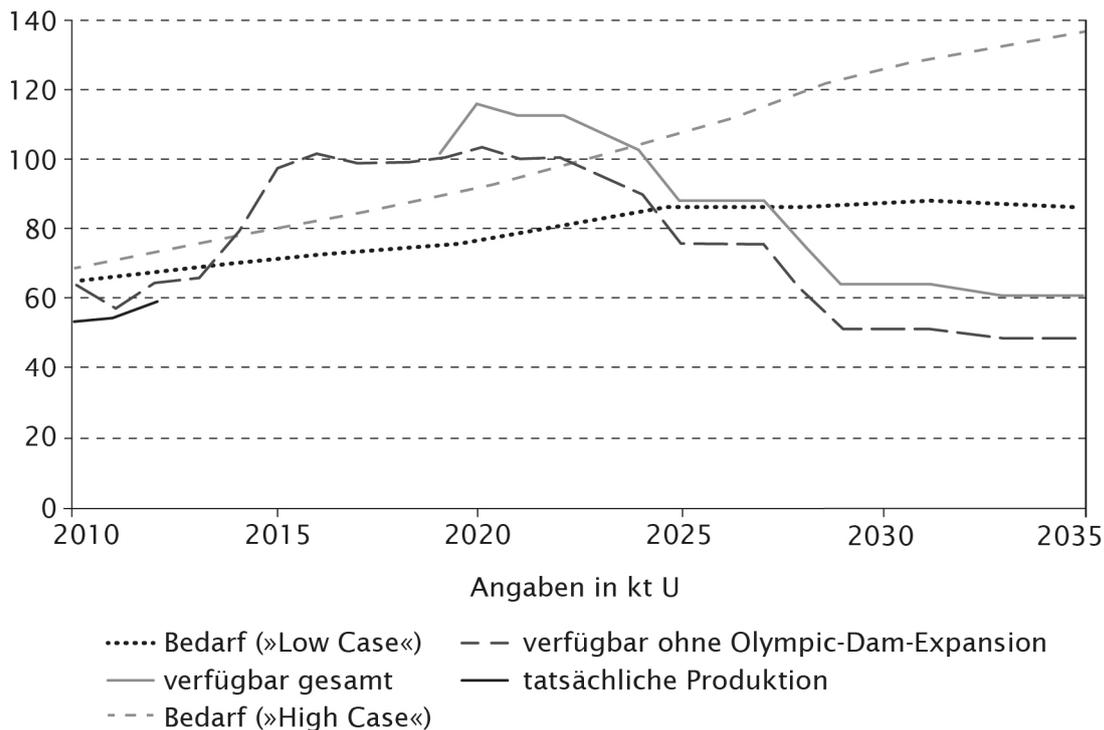
Frimmel (2010) erstellte ein Verfügbarkeitsszenario von Uran aus Erzen bis 2035 (Abb. 4.2) auf Grundlage der von ihm erhobenen Ressourcen und Minenprojekte. Schon zu Beginn stellte er fest, dass nicht alle von ihm ermittelten Uranressourcen tatsächlich für den Abbau zur Verfügung stehen. Kurzfristig verfügbar sind per Definition die Reserven in den derzeit im Abbau befindlichen Minen. Bei diesen Minen erfolgte (aus Gründen der besseren methodischen Handhabbarkeit) eine Einschränkung auf jene 17 Minen, die jeweils mehr als 2% zur globalen Produktion beitragen, insgesamt 78,6% der Weltproduktion. Um einen Näherungswert für die gesamte Weltproduktion zu erhalten, wurden die so gewonnenen Werte mit dem Faktor 1,2 multipliziert. Aus den geplanten Laufzeiten bzw. den verfügbaren Ressourcen kann damit ein Sockel der zukünftigen Uranversorgung abgeleitet werden, der mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch tatsächlich zur Verfügung stehen wird.

Hinsichtlich der möglichen zukünftigen Produktion unterscheidet Frimmel (2010) zwischen den jeweiligen Projektplanungsfortschritten. Je weiter ein Projekt fortgeschritten ist, desto früher steht dabei eine gegebene Ressource am Markt zur Verfügung. Zusätzlich bedeutet eine fortgeschrittene Planung auch eine höhere Wahrscheinlichkeit der tatsächlichen Umsetzung. Dementsprechend fügen sich Minen, die als im Bau identifiziert wurden, zur Gänze in das Szenario ein. Bei Minenprojekten, die sich in anderen Planungsphasen befinden, werden solche ausgefiltert, die zu klein sind, um einen nennenswerten Beitrag zur globalen Uranproduktion bis 2035 zu liefern. Bei Projekten mit Pre-Feasibility Study oder abgeschlossener Feasibility Study betrifft dies jedoch nicht mehr als 10% bzw. 18% der von Frimmel (2010) identifizierten Ressourcen. Für Projekte, die noch nicht einmal einer Pre-Feasibility Study unterzogen wurden, wird aufgrund der langen Vorlaufzeiten für die Errichtung einer Mine für die nächsten 15 Jahre mit keinem nennenswerten Beitrag zur globalen Uranförderung gerechnet. Hier

fließen nur die Vorkommen im Urandistrikt Elkon von Russland und die Lagerstätte von Yeelirrie in Australien in Frimmels Szenario ein.

Um einen Vergleich mit dem Bedarf herzustellen, zog Frimmel (2010) zwei Szenarien aus dem Red Book 2009 (OECD-NEA/IAEA 2010, S. 80 ff.) heran: eine eher konservative und eine kernenergiefreundliche Entwicklung (»Low Case« bzw. »High Case«). Diesen Prognosen zufolge soll die Kapazität aus installierten Kernkraftwerken im Vergleich zum Bezugsjahr 2009 bis 2035 um eine Spanne zwischen 37 und 110% zunehmen, die sich in der Spannweite des Uranbedarfs in Abbildung 4.2 widerspiegelt. Im konservativen Fall (»Low Case«) soll der jährliche Bedarf an Uran im Vergleich zu 2009 von 65 kt U auf 87 kt U für 2035 zunehmen. Bei maximalem projektiertem Ausbau der Kernenergie (»High Case«) wird ein Anstieg auf 138 kt U für 2035 vorhergesagt.

Abb. 4.2 Vergleich zwischen prognostiziertem Bedarf an Uran (Red Book »Low Case«/»High Case«) und zur Verfügung stehendem Uran aus bestehenden und geplanten Minen



Ergänzt um die tatsächliche Produktion und interpolierten Werte für den Bedarf in t U.

Quelle: Frimmel 2010 nach OECD-NEA/IAEA 2010

In Abbildung 4.2 ist eine Gegenüberstellung der Red-Book-2009-Bedarfsszenarien (OECD-NEA/IAEA 2010) und der prognostizierten Menge an verfügbarem Uran aus primären Quellen, und zwar aus bestehenden und im Lauf der



nächsten Jahre voraussichtlich in Betrieb gehenden Uranminen, zu sehen. Frimmel (2010) strich dabei die Bedeutung von Olympic Dam für den globalen Markt heraus, insbesondere der Umsetzung der Ausbaupläne vor Ort. Da bereits 2010 ein Ausbau dieser Kapazitäten unsicher war, wurde deshalb die Verfügbarkeit ohne die Olympic-Dam-Expansion dargestellt. Die entsprechenden Pläne wurden bis auf Weiteres zurückgestellt (Kap. 3.1.4.1). Die untere Kurve ist daher als die wahrscheinlichere anzusehen.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Studie ist die Erkenntnis, dass der Uranbedarf nach Auslaufen der russisch-US-amerikanischen Lieferverträge für Uran aus Kernwaffen 2013 durchaus zunächst aus Uranerzlagerstätten abgedeckt werden könnte. Für die Zeit bis etwa 2023 errechnet sich eine hypothetische Überkapazität an jährlich gewinnbarem Uran aus primären Quellen. An dieser Stelle schränkte Frimmel (2010) ein, dass die prognostizierte Überproduktion höchst wahrscheinlich einige für diesen Zeitraum geplante Projekte torpedieren wird und die entsprechenden Ressourcen aller Wahrscheinlichkeit nach erst zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung stehen werden. 2013 zeigte sich bereits, dass die hier prognostizierte Produktion schon einige Prozent über der tatsächlich erfolgten lag. Bei Zittel et al. (2013, S. 79 ff) ist zu sehen, dass sich Produktionsszenarien, die mit derselben Methodik 3 Jahre später erstellt wurden, deutlich unterscheiden. Die schlechte Marktlage, aber auch andere Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Projekten trugen dazu bei, dass die globale Produktion wesentlich langsamer stieg als von der Nuklearindustrie erwartet. Es ist anzunehmen, dass der Bedarf nicht so bald von der Produktion eingeholt wird.

Insgesamt zeigt die Darstellung (Abb. 4.2) ein Maximum in der Uranförderung (Peak Uranium) bei 2022, das sich gut mit den von Frimmel (2010, S. 88 ff.) angestellten theoretischen Überlegungen deckt. Für die Zeit danach wird eine rasche Abnahme in der jährlichen globalen Förderkapazität vorausgesehen. Im Fall des Minimalbedarfs (»Low Case«) wäre es noch möglich, diese Lücke mit Überkapazitäten aus dem Zeitraum ab 2015 zu decken; im Fall des Maximalbedarfs (»High Case«) würde es spätestens ab 2030 zu einem zunehmenden Versorgungsengpass kommen; ohne den Ausbau von Olympic Dam entsprechend früher, wovon eher auszugehen ist.

Frimmel (2010) hält eine zusätzliche, über die Prognose hinaus gehende Fördermenge von ca. 15 kt U pro Jahr für die Zeitspanne 2030 bis 2035 in Betracht der bereits bekannten Ressourcen für durchaus realisierbar. Das würde aber, zumindest im Szenario mit maximalem Bedarf (»High Case«), immer noch ein Defizit von 60 bis 70 kt pro Jahr ab 2030 implizieren, das nicht mehr durch primäre Produktion zu decken wäre. Um die Lücke zwischen dem minimal prognostizierten Bedarf (Red Book »Low Case«) und der prognostizierten verfügbaren Uranmenge bis 2035 zu schließen, wäre in den nächsten 10 Jahren bereits die Neuentdeckung von zwei weiteren Lagerstätten vergleichbar mit Olympic Dam nötig.

Verfügbarkeitsszenario nach IANUS

Die von IANUS (2011) getroffenen Einschätzungen der kurz- und mittelfristen Verfügbarkeit von Uran fußt auf einer detaillierten Analyse von 29 repräsentativen Minen und Minenprojekten in 12 Ländern (IANUS 2011, S. 26 ff.). 19 dieser Minen waren 2011 bereits in Betrieb; 10 befanden sich in Bau oder in der Planung. Diese repräsentativen Minen enthalten etwa drei Viertel der globalen RAR mit Produktionskosten bis 130 US-Dollar/kg U und etwa drei Viertel aller identifizierten Ressourcen (Stand 1. Januar 2009). Die kumulierte Produktion der aktiven Minen betrug 2009 knapp zwei Drittel der Weltproduktion. Insbesondere wurden aus verschiedenen Quellen möglichst genaue Angaben über prognostizierte Produktionsmengen und zukünftige Kapazitätsentwicklungen zusammengetragen. Die Unterscheidung von realer Produktion und Kapazitätsangabe stellte sich als wesentlich heraus, da bei fast allen Minen die reale Produktion – teilweise deutlich – hinter der Kapazitätsangabe zurückbleibt.²⁹ Mehr noch, es finden sich immer wieder Jahre mit extrem starken Rückgängen im Output einzelner Minen, wie z. B. in Ranger 2006, Olympic Dam 2009, McArthur River 2003 und 2008, Rössing 2007, Arlit 2004 bis 2005 sowie Krasnokamensk 2002. Die Ursachen hierfür können Wassereinbrüche, defekte Förderanlagen oder auch Naturkatastrophen im Minengebiet sein. Um diese realen Gegebenheiten modellartig berücksichtigen zu können, wurden Korrekturfaktoren durch Quotientenbildung aus Produktions- und Kapazitätsangaben der Vergangenheit ermittelt. Für mehr als die Hälfte der aktiven Minen konnte ein Korrekturfaktor für die letzten 3 Produktionsjahre (3-J-Faktor) ermittelt werden und für etwas weniger als die Hälfte auch ein Korrekturfaktor für die letzten 8 Jahre (8-J-Faktor). Für die übrigen Minen konnte durch Mittelung über diese Faktoren ein generischer globaler Korrekturfaktor errechnet werden. Dieser generische 3-J-Faktor lag bei 0,85 und der 8-J-Faktor bei 0,82.

Auf Basis dieser Informationen über die 29 repräsentativen Minen und Minenprojekte wurden Szenarien für die (primäre) Uranproduktion bis 2030 modelliert. Bei den drei Best-Case-Szenarien (S1 bis S3) wurden keine Anpassungen der erwartbaren Produktion durch die Korrekturfaktoren vorgenommen (S1) oder es wurden Korrekturen nur in schwacher Weise berücksichtigt durch

²⁹ An dieser Stelle ist auch auf Dittmar (2009, S. 11 ff.) hinzuweisen, der feststellte, dass Kapazitäts- und Produktionsprognosen für Länder systematisch überschätzt werden. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum den Prognosen im Red Book der OECD-NEA/IAEA hinsichtlich der zukünftigen Produktionserwartung kein Vertrauen geschenkt werden kann, denn hier werden in der Regel nur die Kapazitätsangaben bzw. -erwartungen der Betreiber berücksichtigt. Entsprechend benutzt auch die WNA (2009, 105) für ihre prospektiven Produktionsszenarien Korrekturfaktoren, die allerdings nicht minenspezifisch betrachtet und wohl auch nicht auf detaillierteren Analysen von konkreten Minendaten basieren: 0,9 für gegenwärtig betriebene Minen; 0,8 für Minen, die sich in Entwicklung befinden; 0,7 für geplante Minen und 0,6 für prospektive Minen. Für Lower-Case-Szenarien werden diese Faktoren noch deutlich reduziert auf 0,4 für Minen in Entwicklung und auf 0 für geplante und prospektive Minen.



eine Korrektur mit minenspezifischen 3-J-Faktoren, bei den 11 Minen, für welche diese ermittelbar waren (S2), oder auch für die weiteren Minen durch Verwendung des generischen 3-J-Faktors (S3). In allen diesen Best-Case-Szenarien wurden die Betreiberangaben für die bestmögliche Produktionskapazität bzw. einen entsprechenden Minenausbau vorausgesetzt. Diese Best-Case-Szenarien sind demnach nicht sonderlich realistisch und geben eher eine absolute obere Grenze für eine maximal mögliche zukünftige Produktionsrate an. In den zwei konservativen Szenarien S4 und S5 werden – in unterschiedlich starker Weise – Korrekturen an betreibereigene Zukunftsangaben über die Produktion (8-J-Faktoren) und über die Kapazität unter Berücksichtigung der diesbezüglichen Erfahrungen in der Vergangenheit berücksichtigt. Im Szenario S5 wurden in der Regel die Kapazitätsangaben für 2010 beibehalten, es sei denn, Kapazitätserweiterungen waren bereits in Bau oder es lagen zumindest technische Reports vor, mit denen eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Realisierung als gegeben gelten konnte.

Diese Modelle wurden durch das Hinzunehmen der weiteren Minen, die nicht zu der repräsentativen Auswahl gehören, sowie durch die Abschätzung der Beiträge aus sekundären Uranressourcen zur Gesamturanversorgung erweitert, wie im Kapitel 3.2 erläutert. Für den Beitrag der sekundären Ressourcen wurde zwischen einer minimal und einer maximal erwartbaren Menge differenziert, sodass eine gewisse Bandbreite berücksichtigt wurde (Abb. 4.2). Die zusätzlich zur repräsentativen Minenauswahl produzierenden Minen wurden mit einem kontinuierlichen Sockelbetrag von 18.000 t (Produktionsrate 2009) über den ganzen Zeitraum berücksichtigt. Damit ist die sicher zu optimistische Annahme verbunden, dass diese Minen ihr Produktionsniveau über die Zeitspanne bis 2030 halten können.

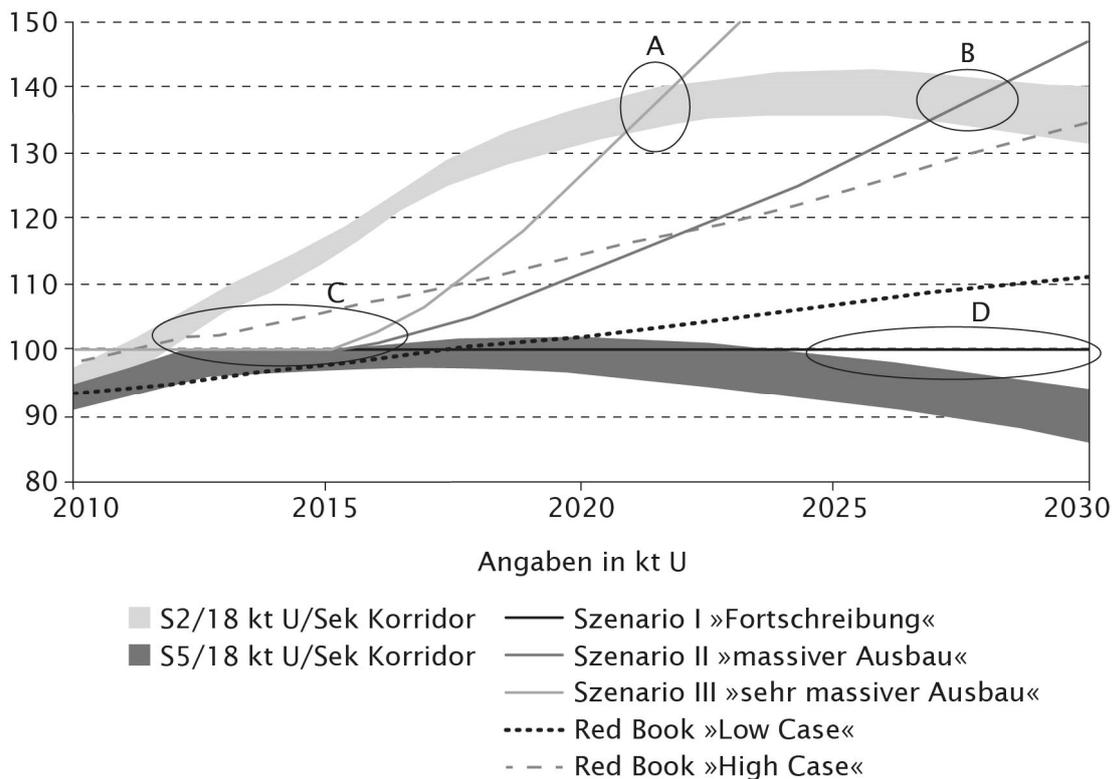
Nun kann die Summe der Beiträge zur Uranproduktion bis 2030 betrachtet werden. In allen Szenarien für die primäre und sekundäre Uranproduktion steigen die jährlichen Produktionsraten zunächst bis 2017 an. Die Maxima liegen für die Best-Case-Szenarien S1 bis S3 zwischen 105 und 120 kt U und für die konservativen Szenarien S4 und S5 etwas oberhalb von 70 kt U. Nach 2020 wird eine wieder abfallende Tendenz deutlicher. Eine ganze Reihe von repräsentativen Minen wird innerhalb des Betrachtungszeitraums bereits erschöpft sein. Dementsprechend fällt die erwartbare Produktionsrate in allen Szenarien nach 2025 schneller ab als in den Jahren zuvor. Die Modellszenarien liefern Produktionsraten für 2030 im Bereich von etwa 80 kt für die Best-Case-Szenarien und zwischen 40 und 50 kt für die konservativen Szenarien.

Diese Uranversorgungsszenarien wurden nun mit den Bedarfsmengen verglichen, die aus Szenarien für die zukünftige Entwicklung der Kernenergienutzung resultieren. Szenario I geht von einer Fortschreibung der gegenwärtigen Kernenergiekapazität auf gleichem Stand aus. Szenario II entspricht dem zuvor beschriebenen massiven nuklearen Ausbauszenario (Vervierfachung der Nuk-



learkapazität bis 2050); Szenario II entspricht dem sehr massiven Ausbauszenario (Verzehnfachung bis 2070). Hinzutreten, wie bei Frimmel (2010), die Red-Book-Szenarien (»Low Case« und »High Case«), bei denen ein weniger massiver bzw. moderater Anstieg der Kernenergiekapazitäten prognostiziert wurde (511 GW_{el} bzw. 782 GW_{el} für 2035).

Abb. 4.3 Darstellung von kumulierten, kombinierten Produktionsprognosen und Bedarfsprognosen für Uran im Zeitraum 2010 bis 2030



Die Buchstaben bezeichnen die Schnittbereiche von Bedarfs- und Produktionsszenarien.

Normiert auf den jeweiligen Jahreswert des Szenarios »Fortschreibung«.

Quelle: IANUS 2011

Eine detaillierte Erörterung der Ergebnisse findet sich im zugrundeliegenden Gutachten von IANUS (2011). Den größten Einfluss auf die verfügbaren Uranmengen in den verschiedenen Szenarien hat die Unterscheidung in »Best Case« und »konservativ«, weshalb eine grobe Trennung in diese beiden Fälle für die weitere Betrachtung der Ergebnisse hier ausreicht. In Abbildung 4.3 sind stellvertretend das Best-Case-Szenario S2 und das konservative Szenario S5 der primären Produktion im Vergleich zu den Bedarfsszenarien dargestellt. Die Szenarien inkludieren dabei die Bandbreite der minimal und maximal zu erwartenden



tenden sekundären Ressourcen, was zu den Korridoren führt (Abb. 4.3). Zur besseren Darstellbarkeit wurden alle Werte auf das Bedarfsszenario »Fortschreibung« normiert (Fortschreibung = 100).

Für die eher unrealistischen Best-Case-Szenarien ergibt sich, dass sowohl im Falle der Fortschreibung des derzeitigen Bedarfs als auch in den beiden Red-Book-Szenarien zum zukünftigen Verbrauch bis 2030 keine Versorgungsengpässe zu erwarten wären. Da das Szenario S2 als absolute Maximalabschätzung möglicher Uranproduktion angesehen werden muss, bei dem keine gravierenderen Probleme oder Verzögerungen bei einzelnen Minen oder Minenprojekten einbezogen wurden und die Kapazitätsentwicklungen, wie angekündigt, tatsächlich realisierbar sein müssen, kann keinesfalls als gesichert gelten, dass beim Red-Book-Szenario »High Case« ausreichende Uranressourcen in den späteren 2020er Jahren verfügbar sein werden. Massive Ausbauszenarien würden unter diesen Best-Case-Szenarien der Uranproduktion im Zeitfenster von 2020 bis 2030 erhebliche Probleme aufzeigen (Schnittzonen A und B der Bedarfs- mit den Verfügbarkeitszenarien in Abb. 4.3), da das benötigte Uran nicht zur Verfügung gestellt werden kann. Dies bestätigt, dass ein massiver Ausbau der Kernenergie von der Versorgungsseite her nicht umsetzbar ist – und das bereits in der Startphase eines schnellen und massiven Ausbaus.

Die konservativen Szenarien sind aufgrund des höheren Anteils von Sekundäruran an der Gesamtversorgung auch mehr von der Bandbreite des zur Verfügung stehenden Beitrags aus sekundären Quellen (Minimum-Maximum-Korridore) abhängig. Bewegt sich dieser Beitrag am unteren Rand der abgeschätzten Bandbreite, scheint gar kein Szenario über den gesamten betrachteten Zeitraum umsetzbar – nicht einmal bei der Kernenergienutzung auf heutigem Stand.³⁰ Auch wenn die maximal abschätzbare Menge aus sekundären Quellen verfügbar gemacht werden kann, sind bei allen Bedarfsszenarien im Betrachtungszeitraum Versorgungslücken zu erwarten (Schnittzone D in Abb. 4.3). Diese Lücken könnten im Fall eines moderaten Kernenergieausbaus (im Red Book »Low Case« summiert sich die Lücke bis 2030 auf etwa 250.000 t U) auch durch Rückgriff auf noch vorhandene kommerzielle Vorräte und ein möglicherweise doch noch aufgelegtes neues »Megatons to Megawatts Program« nicht ohne Weiteres geschlossen werden. Bei den massiveren Ausbauszenarien der Kernenergie sowie dem Red Book »High Demand Case« sind die Versorgungs-

30 Die akkumulierte Deckungslücke bis 2030 liegt für ein reines Fortschreibungsszenario auf heutigem Stand bei Annahme des konservativen Versorgungsszenarios S5 (Minimum der Sekundären) bei etwa 200.000 t U und tendiert beim Red Book »Low Case« Richtung 400.000 t. Die momentan nicht in Betrieb befindlichen japanischen Reaktoren haben einen jährlichen Uranbedarf von etwa 8.000 t. Wenn durch den Stillstand des japanischen Kernenergieprogramms weiter global Uran eingespart wird, dann könnten zwar relevante Beiträge zur Schließung von Deckungslücken generiert werden. Unter konservativen Annahmen mit pessimistischer Tendenz für die sekundäre Uranversorgung wird dies aber nicht ausreichen. Es müssten weitere erhebliche primäre oder sekundäre Uranquellen mobilisiert werden.

lücken quasi im kompletten Ausbauezeitraum existent (Schnittzone C in Abb. 4.3). Auch bei einer Fortschreibung der Kernenergienutzung auf heutigem Niveau entstehen Lücken. In diesem Fall ist jedoch vorstellbar, dass die Deckungslücke (Schnittzone D in Abb. 4.3) durch zusätzliche sekundäre Quellen, die erschlossen werden müssten, vielleicht geschlossen werden kann.

4.3 Andere Szenarien und Einschätzungen

Schon 2006 wurde vermutet, dass kurzfristig Probleme auftreten könnten, den Uranbedarf für die Kernenergienutzung zu decken, wenn der Kapazitätsausbau oder die Neueröffnung von Uranminen nicht schnell genug erfolgen können. Entsprechende Warnungen finden sich in IEA (2006), Diehl (2006) und Zittel/Schindler (2006). Auch Prognos (2009, S. 47 ff.) schilderte mögliche Engpässe zwischen 2015 und 2030.

Ähnliche Hinweise, wenngleich nicht offenkundig, finden sich auch immer wieder in Pressemitteilungen zur Veröffentlichung des Red Book der OECD-NEA/IAEA. Zwar wird hier betont, dass die Ressourcen, bei gleichbleibendem Bedarf, langfristig ausreichend sind – diese Methode wurde bereits zu Beginn des Kapitels 4.1 kritisiert – jedoch begleitet von dem folgenden oder ähnlichen Statements:

IAEA (2012): »Although ample resources are available, meeting projected demand will require timely investments in uranium production facilities. This is because of the long lead times (typically in the order of ten years or more in most producing countries) required to develop production facilities that can turn resources into refined uranium ready for nuclear fuel production.«

Daraus lässt sich ableiten, dass dieses Problem nicht nur im akademischen Bereich, sondern auch in der Industrie wahrgenommen wird. Boytsov (2012), stellvertretender Direktor des staatlichen russischen Minenbetreibers ARMZ, folgert bei seiner Präsentation, dass dem Uranmarkt nach 2020 billige Uranressourcen fehlen könnten, um die Produktion aufrechtzuerhalten.

Areva (2013, S. 69) erklärt in seinem Jahresbericht: »Prospects for an increase in global production over the medium and long terms have declined: some projects have been postponed or cancelled, capital programs have been cut, and the global exploration effort is down, particularly on the part of junior mining companies with limited access to capital.«

Die WNA (2011a) kommt zu den folgenden Ergebnissen: Im Upper-Case-Szenario der Produktion – der laut WNA maximal möglichen Produktion bis 2030 – sind Angebot und Nachfrage für den Zeitraum bis 2025 ausgeglichen, danach werden weitere neue bis jetzt ungeplante Bergwerke benötigt, um auch eine starke Nachfrage nach Uran decken zu können. Im Lower-Case-Szenario – der von der WNA angenommenen Minimalproduktion bis 2030 – kann, wegen des Mangels an neuer Minenentwicklung und der Schließungen von bestehen-



den Minen, nur das Szenario mit geringer Nachfrage, welches einen Rückgang der global installierten Reaktorleistung bedeutet, bis 2030 abgedeckt werden.

Diese Einschätzung deckt sich auch mit der von Frimmel und Müller (2011b) getätigten Prognose: »A number of projects will be delayed from the 2010's into the 2020's in order to keep the supply/demand relationship balanced; a widening gap between supply and demand will open up in the 2030's«.

Die BGR (2009, S. 23) klassifiziert nur die gesicherten Vorkommen mit Gewinnungskosten unter 40 US-Dollar/kg U als Reserven, das sind »die Mengen eines Energierohstoffes, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können«, demnach würden diese Reserven den Bedarf nur noch für einen Zeitraum unterhalb eines Jahrzehnts decken. Diesen Pessimismus teilt die BGR (2009, S. 13 f.) aber nicht explizit, betont aber das Fortbestehen einer »Lücke zwischen der jährlichen Förderung und dem Verbrauch«.

Zuletzt wird noch auf zwei Publikationen aus 2013 hingewiesen. Hall und Coleman (2013) sehen technische, regulatorische und finanzielle Herausforderungen, die die Entwicklung neuer Produktionsstätten behindern. Sie folgerten: »... mine development is proceeding too slowly to fully meet requirements for an expanded nuclear power reactor fleet in the near future (to 2035), and unless adequate secondary or unconventional resources can be identified, imbalances in supply and demand may occur.«

Zusätzlich sehen Hall und Coleman (2013) die Abhängigkeit von wenigen großen Minen und Produktionsländern als Unsicherheit bei ihren Abschätzungen zur zukünftigen Versorgung. Ähnliches wurde bei Zittel et al. (2013) angemerkt. Insbesondere wird auf die Abhängigkeit der Szenarien der zukünftigen Produktionsentwicklung von den großen Produktionsstätten Olympic Dam, Elkon, Husab und Cigar Lake hingewiesen, wie auch schon bei IANUS (2011:179). Auch hier kann aus den Szenarien geschlossen werden, dass hohe Wachstums-erwartungen der Kernenergie nicht von entsprechenden Uranressourcen gestützt sind. Es fehlt an der schnellen Ausbaufähigkeit der Abbaukapazitäten sowie langfristig an ausreichenden Uranmengen. Vielmehr sehen Zittel et al. (2013) die Kernenergie nur für ein geringes Wachstum ausreichend mit Uran versorgt und das lediglich für etwa eine Reaktorgeneration (40 bis 60 Jahre).

Energie- und CO₂-Bilanz in Abhängigkeit vom Urangehalt im Erz

Kernenergie wurde bzw. wird verschiedentlich als Ausweg aus dem Energie-Klima-Dilemma ins Gespräch gebracht, mit dem Argument, die Stromgewinnung daraus wäre klimaneutral, d.h. ohne nennenswerten Ausstoß von CO₂. Um die Emissionen verschiedener Arten der Stromerzeugung vergleichbar zu machen, müssen Betrachtungen über die gesamten Umweltwirkungen (Lebenszyklusanalysen) durchgeführt werden. Bei der Kernenergie umfassen diese den

Abbau von Uran, die Anreicherung und Brennelementherstellung, die Errichtung, den Betrieb und den Rückbau der Kraftwerke sowie die Endlagerung der Abfälle. Mittlerweile wurden zahlreiche Studien zu dem Thema verfasst. Eine der prominenteren Metastudien ist die von Sovacool (2008). Der Autor erhebt dabei eine Bandbreite von 1,4 bis 288 g Treibhausgasemissionen (angegeben in CO₂-Äquivalenten – CO₂e) je erzeugte kWh Elektrizität bei einem Mittelwert von 66 g CO₂e/kWh.³¹ Diese Studie wurde jedoch vielfach vor allem wegen der angeblich einseitigen Auswahl an zugrundeliegenden Studien kritisiert. So auch von der OECD-NEA (2012), die ihrerseits Mittelwerte aus verschiedenen Studien im Bereich von 29 bis 57,7 g CO₂e/kWh angab. Wagner et al. (2007) wiesen in ihrer Metastudie einen Plausibilitätsbereich von 10 bis 30 g CO₂e/kWh aus.

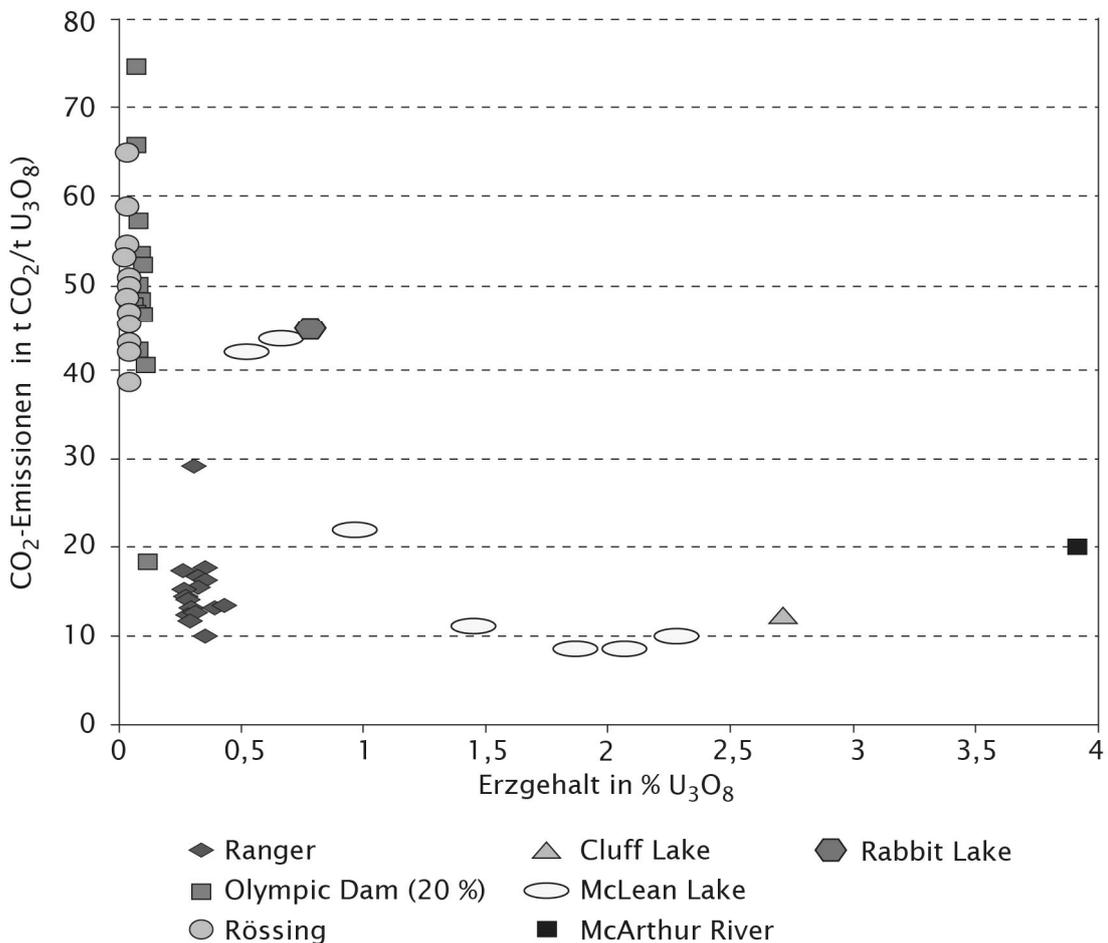
Auffällig ist hier die große Bandbreite der Ergebnisse. Einigkeit herrscht jedenfalls darüber, dass zwei Schlüsselfaktoren die Resultate im Wesentlichen bestimmen: Erstens das Verfahren der Anreicherung und zweitens der Urangehalt der Lagerstätten. Bei Ersterem besteht durch die sukzessive Ablösung der Diffusionsanreicherung durch Zentrifugenanreicherung ein Wechsel zu energieeffizienteren³² und dadurch CO₂-ärmeren Technologien. Bei Zweiterem zeigt im Bereich des Uranabbaus die Tendenz dagegen in Richtung sinkender Urangehalte im Erz.

Die entscheidenden Parameter für die CO₂-Bilanz sind Wasser- und Energieverbrauch, die naturgemäß je nach Lagerstättentyp, Erzqualität, Abbaumethode, lokalen Klimabedingen und anderen Faktoren variieren. Da bei einem niedrigen Urangehalt im Erz mehr Material verarbeitet werden muss, um dieselbe Menge Uran zu gewinnen, ist hier generell ein höherer Einsatz von Wasser und Energie zu erwarten. Für Minen, für die entsprechende Daten offengelegt wurden, konnte dieser Zusammenhang auch in der Praxis belegt werden (Abb. 4.4) (mit Ausnahme einiger weniger Minen mit extrem hohen Urangehalten im Erz).

Da historisch natürlich jene Lagerstätten ausgebeutet wurden, die am einfachsten erreichbar waren und sich durch höhere Erzgehalte auszeichneten, kann davon ausgegangen werden, dass in Zukunft der Trend zu niedrigeren Erzgehalten und damit einer schlechteren CO₂-Bilanz im Uranbergbau sukzessive fortschreiten wird. Diese Vermutung wird durch die vergleichsweise niedrigen Urangehalte in den derzeit in der Konstruktions- bzw. konkreten Planungsphase stehenden Projekte gestützt.

31 Im Vergleich dazu liegen die Emissionen von Kohle, als klimaschädlichste Form der Stromerzeugung, im Bereich von 1.000 g CO₂e/kWh.

32 Der Nachteil dabei ist die extrem herabgesetzte Entdeckbarkeit des Anlagenbetriebs von außen, was aus der Perspektive der Nonproliferation sehr problematisch ist.

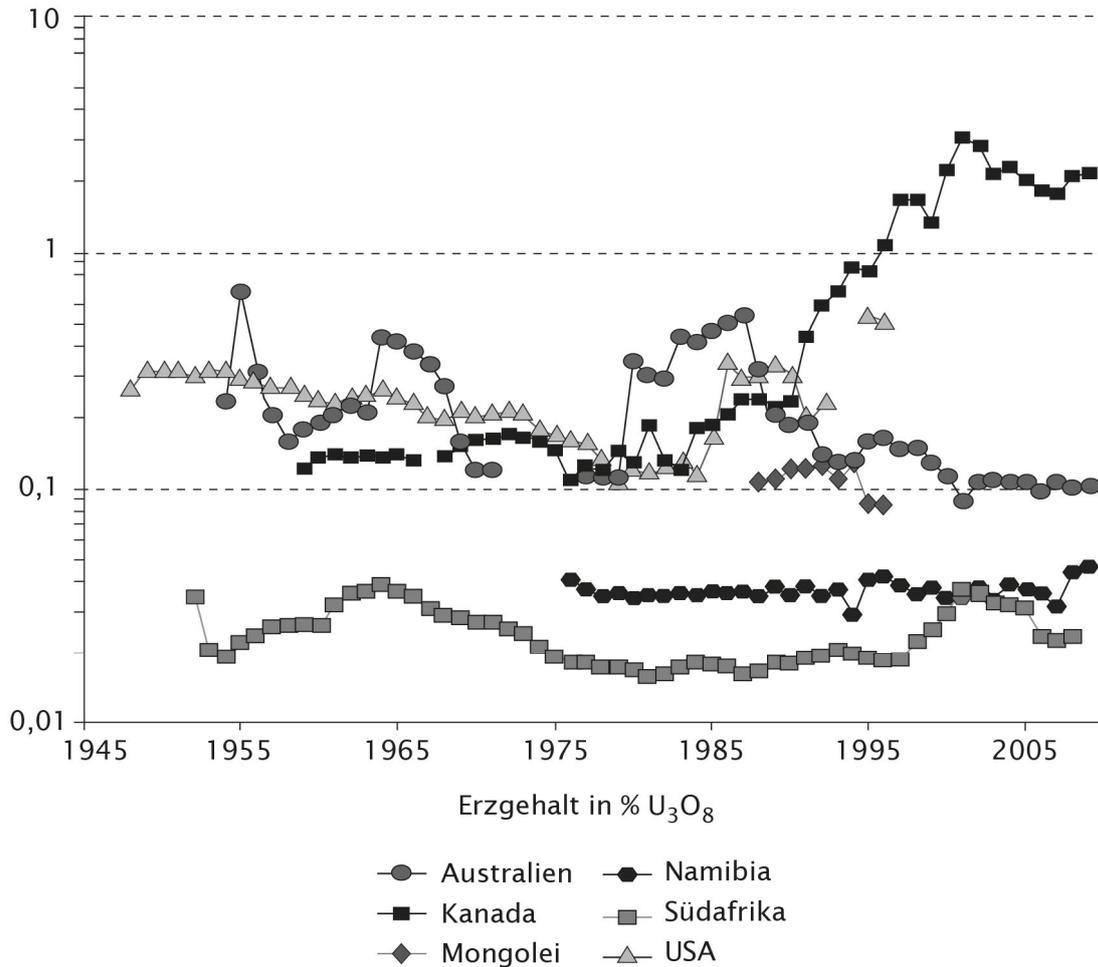
Abb. 4.4 CO₂-Emission je produzierte t U₃O₈ für ausgewählte Uranminen

Quelle: Frimmel 2010

In Abbildung 4.5 ist die durchschnittliche Urankonzentration in primären Uranerzen aus den wichtigsten Förderländern dargestellt. Mit Ausnahme von Kanada, wo der Ausbau der sehr reichen Lagerstätten im Athabascabecken zu einem deutlichen Anstieg in den landesdurchschnittlichen Urangehalten in den letzten Jahrzehnten führte, ist bei allen wichtigen Uranförderländern eine Stagnation bzw. Abnahme festzustellen.

Die negative Korrelation zwischen Erzgehalt und Energieaufwand ist typisch für die bergbauliche Gewinnung von mineralischen Rohstoffen im Allgemeinen (Norgate/Jahanshahi 2010) und hat fundamentale Auswirkungen auf die Rentabilität von niedriggradigen Vorkommen. Der Aufwand für die Uranerzeugung nimmt somit mit abnehmendem Urangehalt im Erz zu. Empirische Daten und hypothetische Studien dazu wurden 2007 erstmals von Storm van Leeuwen und Smith (2007) zusammengeführt und einige Jahre später aktualisiert (Abb. 4.6).

Abb. 4.5 Veränderung der landesdurchschnittlichen Urangehalte in primären, konventionellen Uranlagerstätten der wichtigsten Förderländer seit 1945



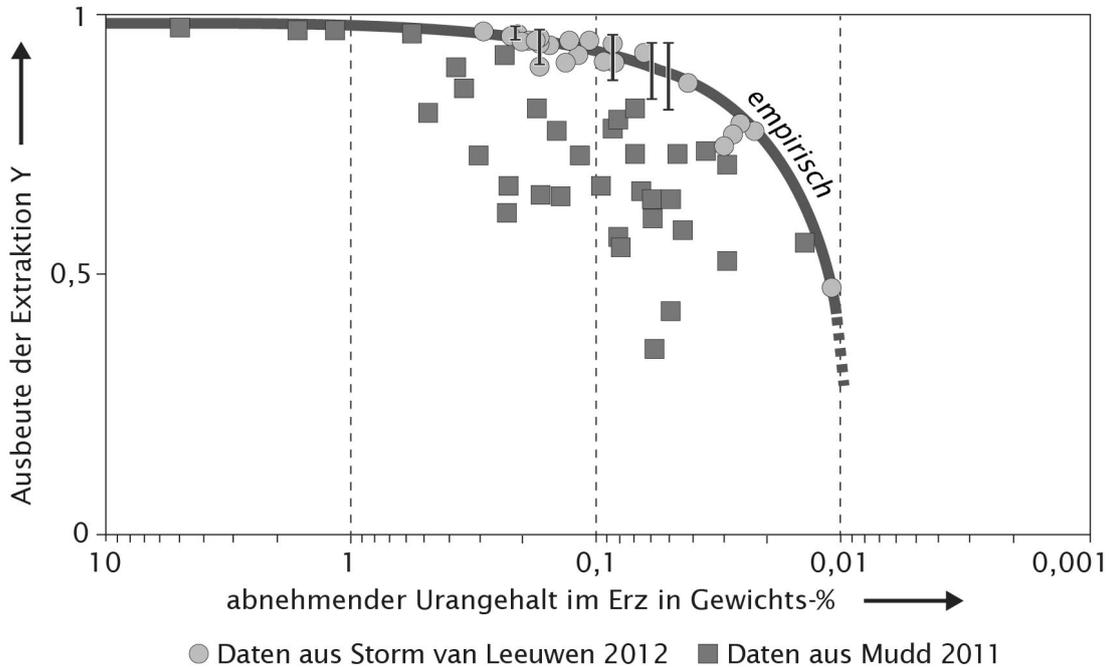
Quelle: Frimmel 2010

Legt man eine Kurve durch die gesammelten Daten, so deutet diese an, dass der Yield – der Anteil des im Gestein vorhandenen Urans, der gewonnen werden kann – exponentiell abfällt und bei einem Urangehalt im Bereich von 0,02 % bis 0,01 % so weit absinkt, dass mehr Energie für die Uranproduktion verbraucht wird, als im Reaktor daraus gewonnen werden kann.³³

Storm Van Leeuwen (2012) spricht von einer »Energieklippe« (Abb. 4.7), die letztlich auch zu einer »CO₂-Falle« führt, da je nach Energieaufwand und eingesetztem Energieträger bei der Urangewinnung auch der CO₂-Ausstoß soweit ansteigen kann, dass die Klimabilanz der Kernreaktoren im Betrieb negativ wird.

33 Der Kurvenfit, den Storm van Leeuwen (2012) in seiner Abbildung nutzt, ist allerdings anzweifelbar. Er wird möglicherweise unzutreffend exponentiell modelliert und führt im entscheidenden Bereich nur durch sehr wenige Messpunkte.

Abb. 4.6 Exponentielle Abnahme in der Menge an extrahierbarem Uran bei abnehmendem Urangehalt im Erz



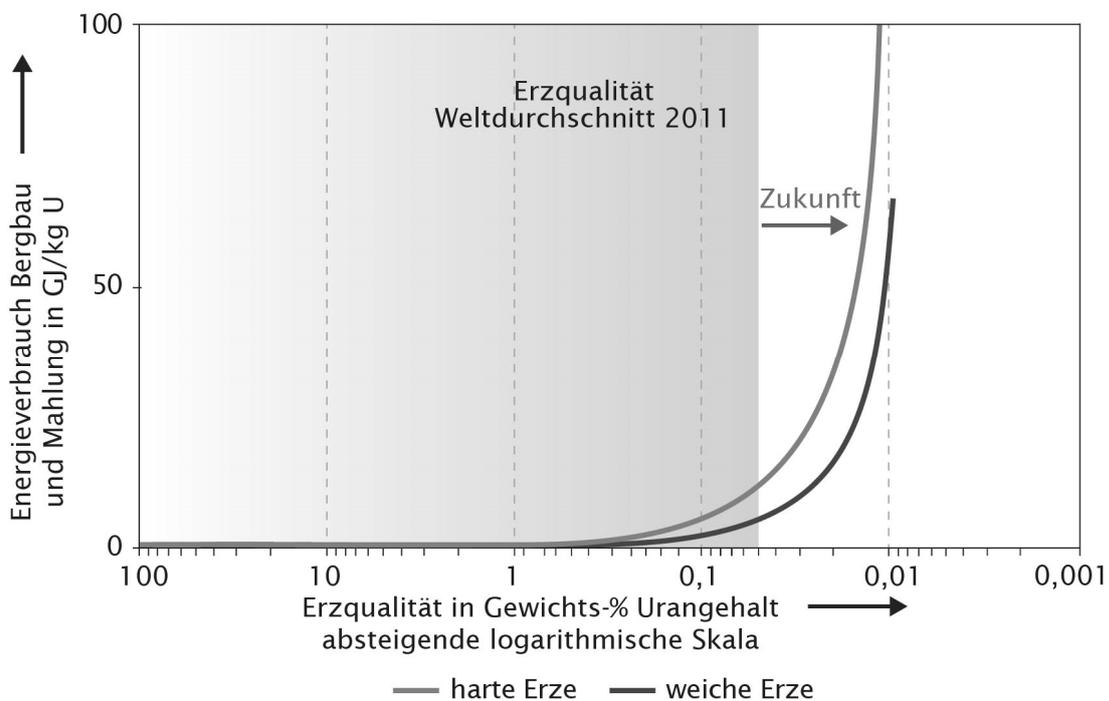
Quelle: nach Storm van Leeuwen 2012

Die Kurven, die in der Abbildung 4.6 gezeigt sind, werden jedoch im entscheidenden Bereich (bei Urangehalten von 0,01 bis 0,05%) nur durch wenige empirische Messpunkte gestützt. Dies wird u. a. von der WNA (2013a) kritisiert, die auf die Diskrepanz zwischen dem empirisch belegten Energiebedarf einiger konkreter Minen und dem gemäß den Kurven errechneten Energiebedarf hinweist. So werden beispielsweise für die Minen Ranger, Olympic Dam und Rössing etwa 0,8, 5 und 1 PJ als jährlicher Energiebedarf angegeben. Berechnungen nach Storm van Leeuwen (2012) ergeben hingegen 5, 60 und 69 PJ für die entsprechenden Erzgehalte. Ein gravierendes Manko für die hier diskutierten Analysen ist, dass etliche Minenbetreiber keine bzw. keine verlässlichen und überprüfbaren Daten hinsichtlich ihres Wasser- und Energieverbrauchs offenlegen.

Trotz dieser unterschiedlichen Einschätzungen ist der Zusammenhang als solcher aber unbestritten. Ab einer bestimmten Urankonzentration im Erz ist der Aufwand für die Urangewinnung zu groß, um sowohl energetisch als auch aus Sicht der CO₂-Emission noch vertretbar zu erscheinen. Dies belegen weitere Studien und Lebenszyklusanalysen (AEA/ÖÖI 2011; ISA 2006). Zumindest für den Abbau über und unter Tage nehmen die bewegten Materialmassen zu, wenn der Urangehalt des Erzes sinkt. Kleinere Urangehalte lassen tatsächlich entsprechende Energieklippen erwarten, sie treten allerdings möglicherweise erst bei noch kleineren Urangehalten auf. Inwiefern dies auf das ISL anwendbar

ist – das immerhin fast die Hälfte der derzeitigen Produktion ausmacht – ist nicht ganz klar. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich hier vor allem der erhöhte Wasserbedarf negativ auf die Klimabilanz auswirkt. Auf jeden Fall gilt es hier aber zu berücksichtigen, dass man auf gewisse geologische Formationen beschränkt ist und der Gewinnungsfaktor im Allgemeinen geringer ist als bei den konventionellen Methoden. Letztlich gilt auch hier, dass der Anteil des gewinnbaren Urans mit dem Erzgehalt zurückgeht.

Abb. 4.7 Der Energieverbrauch der Gewinnung von Uran aus der Erdkruste als Funktion des Erzgehalts



Quelle: nach Storm van Leeuwen 2012

Insgesamt ergibt sich ein Dilemma für die zukünftige Urangewinnung, da die Zukunft des Uranbergbaus, zumindest ab den 2030er Jahren, bei niedriggradigen Uranerzvorkommen liegen wird. Der Abbau dieser Vorkommen wird zwangsläufig mit erheblich höheren Kosten verbunden sein. Alles in allem würde der Abbau von natürlich vorkommendem Uran in der mittel- bis langfristigen Zukunft neuer technologischer Entwicklungen zu einem energieeffizienteren Abbauprozess bedürfen, um wirtschaftlich gerechtfertigt zu sein. Beim derzeitigen technologischen Stand erscheinen Uranvorkommen mit Urankonzentrationen in der Größenordnung von 0,01 % oder darunter energetisch nicht sinnvoll nutzbar zu sein. Die hier angeschnittene Frage besitzt eine zentrale Bedeutung für die Bewertung der Klimabilanz der Kernenergie. Allerdings ist der Wissensbestand hierzu noch eher lückenhaft und wenig konsoli-

4.3 Andere Szenarien und Einschätzungen



diert. Bevor belastbare Einschätzungen getroffen werden können, wären daher sowohl allgemeine als auch standortspezifische Forschungsfragen zu geologischen, verfahrenstechnischen und energiebilanziellen Gesichtspunkten zu klären. Hierfür wäre als erster Schritt allerdings die verifizierbare Offenlegung von Daten der Minenbetreiber erforderlich, die sich bisher diesbezüglich zum Teil eher wenig kooperativ gezeigt haben. In den letzten Jahren wurde damit begonnen, zu testen, inwieweit mineralchemische Fingerabdrücke des Uranerzes einer gegebenen Lokalität dazu verwendet werden kann, um einen Herkunftsnachweis für Uran zu ermöglichen (Frimmel et al. 2014).





5 Literatur

5.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Frimmel, H.E. (2010): Verfügbarkeit von natürlich vorkommendem Uran. Leinach
IANUS (Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit
der Technischen Universität Darmstadt) (2011): Verfügbarkeit von Uran (Englert
M.; Kütt M.; Liebert W.). Darmstadt

5.2 Weitere Literatur

AEA; ÖÖI (Austrian Energy Agency; Österreichisches Ökologieinstitut) (2011): Energiebilanz der Nuklearindustrie. Analyse von Energiebilanz und CO₂-Emissionen der Nuklearindustrie über den Lebenszyklus. Wien

AFRODAD (African Forum and Network on Debt and Development) (2013): The revenue costs and benefits of foreign direct investment in the extractive industry in Malawi: The case of Kayelekera Uranium mine. Harare

Anglogold Ashanti (2010a): Annual Financial Statements 2009. Building a strong foundation. Johannesburg

Anglogold Ashanti (2010b): Mineral resource and ore reserve report 2009. Johannesburg

Anglogold Ashanti (2011): Mineral resource and ore reserve report 2010. Pure Gold. Johannesburg

Anglogold Ashanti (2012): Mineral resource and ore reserve report 2011. Pure Gold. Johannesburg

Anglogold Ashanti (2013): Mineral resource and ore reserve report 2012. Johannesburg

Areva S.A. (2006): Annual Report 2005. Paris

Areva S.A. (2013): 2012 Reference Document. Paris

ARMZ (2011): "ARMZ Uranium Holding Co. – Rosatom State Corporation's Mining Arm"

Arnold, N.; Kromp, W.; Zittel, W. (2011): Perspektiven nuklearer Energieerzeugung bezüglich ihrer Uran Brennstoffversorgung. In: Energieversorgung 2011(7). Märkte um des Marktes Willen? Wien

Bannerman Resources (2012): Etango Uranium Project. Definitive Feasibility Study. www.bannermanresources.com.au/wp-content/uploads/2016/03/Bannerman-DFS-release-Final-10-April-2012-website.pdf (26.5.2016)

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2009): Energierohstoffe 2009. Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. Hannover

BHP Billiton (2011): Our strategy delivers. Annual report 2010. Melbourne

BHP Billiton (2013): What we value. Annual report 2012. Melbourne

Bloomberg (2013): Rio Tinto, Paladin Namibia Uranium Mines face water shortage. <http://www.bloomberg.com/news/2013-11-18/rio-tinto-paladin-uranium-mines-in-namibia-face-water-shortage.html> (20.3.2014)

- Boytssov, A. (2012): Sustainable development of Uranium production – Time challenge. <http://2012.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present2012/Boytssov.pdf> (20.3.2014)
- Brierley, C (1982): Microbial mining. In: *Scientific American* 247, S. 42–50
- Cameco Corp. (2010a): Annual information form 2009. Saskatoon
- Cameco Corp. (2010b): Cigar Lake project. Saskatoon
- Cameco Corp. (2010c): Inkai operation, South Kazakhstan Oblast, Republic of Kazakhstan. Saskatoon
- Cameco Corp. (2011): 2010 Annual report. Saskatoon
- Cameco Corp. (2013a): 2012 Annual report. Saskatoon
- Cameco Corp. (2013b): Cameco completes NUKEM acquisition. <https://www.cameco.com/media/news/cameco-completes-nukem-acquisition> (10.10.2013)
- Cameco Corp. (2014a): Cigar Lake. <https://www.cameco.com/businesses/uranium-operations/canada/cigar-lake> (4.4.2014)
- Cameco Corp. (2014b): Cree Extension-Millennium. http://www.cameco.com/exploration/major_projects/athabasca_basin/cree_extension-millennium/ (3.4.2014)
- Cameco Corp. (2014c): Uranium price. http://www.cameco.com/investors/markets/uranium_price/ (4.3.2014)
- Chang, R (2013): Uranium price headed for -\$50 in 2014, taking stocks higher. <http://www.mining.com/web/uranium-price-headed-for-50-in-2014-taking-stocks-higher-rob-chang/> (11.12.2013)
- CMSA (Chamber of Mines of South Africa) (2008): Facts and figures 2008. Johannesburg
- CRIIRAD (Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité) (2010): Remarks on the radiological situation in the vicinity of the uranium mines operated by SOMAIR and COMINAK (subsidiaries of Areva) in northern Niger. CRIIRAD Bericht Nr. 10-09, Valence
- Cuney, M.; Kyser, K. (2009): Recent and not-so-recent developments in Uranium deposits and implications for exploration. Mineralogical Association of Canada Short Course Series Nr. 39. Quebec
- Deffeyes, K.S.; MacGregor, I.D. (1980): World Uranium resources. In: *Scientific American* 242(1), S. 66–76
- Delcredere-Ducroire (2013): Country risks. <http://www.delcrederecroire.be/en/country-risks/> (11.11.2013)
- Denison Mines (2014): Midwest project. Property description and location. Toronto, <http://www.denisonmines.com/s/Midwest.asp> (12.10.2014)
- Diakov, A., Rybachenkov, V. (2013): Disposition of excess weapon grade Plutonium: New developments. Center for Arms Control, Energy and Environmental Studies 2014, <http://www.armscontrol.ru/pubs/en/disposition-of-excess-weapon-grade-plutonium-new-developments-en.pdf> (8.5.2015)
- Diehl, P. (2004): Re-enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia. <http://www.wise-uranium.org/pdf/reenru.pdf> (8.5.2015)
- Diehl, P. (2006): Reichweite der Uran-Vorräte der Welt. Berlin
- DIHK (Deutscher Industrie- und Handelskammertag) (2012): Weltweite Verteilung ausgewählter Metallreserven. <https://www.ihk-nuernberg.de/de/media/PDF/Innovation-Umwelt/Jahresthema-2012-Energie-und-Rohstoffe-von-morgen/rohstoffcharts/rohstoffchart-verteilung-metallreserven.pdf> (8.5.2015)
- Dittmar, M. (2009): The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction Chapter I: Nuclear Fission Energy Today. Institute of Partical Physics ETH. Zürich



- Dixon, A. (2010): Left in the dust – AREVA's radioactive legacy in the desert towns of Niger. Greenpeace (Hg.), Amsterdam
- Energy Fuels (2013): White Mesa Mill. Utah. http://www.energyfuels.com/white_mesa_mill/ (8.5.2015)
- ESA (EURATOM Supply Agency) (2013): Annual report 2012. Publications Office of the European Union.
- Frimmel, H.E.; Müller, J. (2011a): Estimates of Mineral Resource Availability – How Reliable Are They? In: Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien e. V. 28, S. 39–62
- Frimmel, H.E.; Müller, J. (2011b): Medium-term uranium supply and demand economics. In: Barra, F.; Reich, M.; Campos, E.; Tornos, F. (Hg.) (2011): Let's Talk Ore Deposits. In :Proceedings of the Eleventh Biennial SGA Meeting. Antofagasta Ediciones Universidad Católica del Norte, S. 39–62
- Frimmel, H.E.; Schedel, S.; Brätz, H. (2014): Uraninite chemistry as forensic tool for provenance analysis. In: Applied Geochemistry 48, S. 104–121
- Fyodorov, G.V. (1999): Uranium deposits of the Inkai–Mynkuduk ore field, Kazakhstan. In: Developments in Uranium Resources, Production, Demand and the Environment. Proceedings of International Atomic Energy Agency Technical Meeting, IAEA-TECDOC 1425, Wien, S. 95–112
- Geißler, A. (2007): Prokaryotic microorganisms in uranium mining waste piles and their interactions with uranium and other heavy metals. TU Bergakademie, Freiberg
- Geoscience Australia (2013): Uranium. Canberra, <http://www.ga.gov.au/minerals/mineral-resources/uranium.html> (4.10.2013)
- Hall, S.; Coleman, M. (2013): Critical analysis of world uranium resources. Scientific Investigations Report 2012–5239. Reston
- Hubbert, M.K. (1956): Nuclear Energy and the Fossil Fuel. Shell Development Company, Exploration and Production Research Division. Houston, <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf>
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (1989): The Recovery of Uranium from Phosphoric Acid. Wien
- IAEA (2001a): Analysis of uranium supply to 2050. Wien
- IAEA (2001b): Manual of acid in situ leach uranium mining technology. IAEA-TECDOC-1239, Wien
- IAEA (2009): World distribution of Uranium deposits (UDEPO) with Uranium deposit classification. Wien
- IAEA (2012): Global Uranium Supply Ensured for Long Term, New Report Shows. Wien, Pressemitteilung, <http://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/2012/prn201219.html> (20.12.2013)
- IEA (International Energy Agency) (2006): World energy outlook 2006. Paris
- ISA (Integrated Sustainability Analysis at The University of Sydney) (2006): Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia. Sydney
- Jaireth S.; McKay A.; Lambert I. (2008): Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons. Australian Government, AUSGEO News 89, Canberra
- Kalin, M.; Wheeler, W.N.; Meinrath, G. (2005): The removal of uranium from mining waste water using algal/microbial biomass. In: Journal of Environmental Radioactivity 78(2), S. 151–177

- Koven, P. (2013): Uranium One bought by top Russian shareholder ARMZ for -Dollar1.3-billion. *financialpost.com*, <http://business.financialpost.com/2013/01/14/uranium-one-bought-by-top-russian-shareholder-armz-for-1-3-billion/> (10.10.2013)
- Kraft, K. (2010): Geologen und Öffentlichkeit sperren Grundwasser für Uranabbau. *Allgemeine Zeitung Namibia*, 24.9.2010
- MacFarlane, A.; Miller, M. (2007): Nuclear Energy and Uranium Resources. In: *Elements* 3(3), S. 185–192
- MiningNe.ws (2013): Uranium mining in Namibia will never be the same. <http://www.miningne.ws/2013/08/08/uranium-mining-in-namibia-will-never-be-the-same/> (10.12.2013)
- Mining Weekly (2013): Ex-DG progressing uranium, power project in Springbok Flats. <http://www.miningweekly.com/article/ex-dg-progressing-uranium-power-project-in-springbok-flats-2013-09-03> (4.11.2013)
- Mudd, G.M.; Diesendorf, M. (2010): Uranium mining, nuclear power and sustainability – rhetoric versus reality. Sustainable Mining Conference, Kalgoorlie
- Nobukawa, H.; Kitamura, M.; Swylen, S.A.M.; Ishibashi, K. (1994): Development of a floating-type system for uranium extraction from seawater using sea current and wave power. In: *Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Osaka
- Norgate, T.E.; Jahanshahi, S. (2010): Low grade ores – Smelt, leach or concentrate? In: *Minerals Engineering*. 23(2), S. 65–73
- OECD-NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development; Nuclear Energy Agency) (2012): *The role of nuclear energy in a low-carbon energy future*. Paris
- OECD-NEA/IAEA (2006a): *Forty years of Uranium resources, production and demand in perspective: The Red Book retrospective*. Paris
- OECD-NEA/IAEA (2006b): *Uranium 2005. Resources, production, and demand*. Paris
- OECD-NEA/IAEA (2008): *Uranium 2007. Resources, production and demand*. Paris
- OECD-NEA/IAEA (2010): *Uranium 2009. Resources, production, and demand*. Paris
- OECD-NEA/IAEA (2012): *Uranium 2011. Resources, production and demand*. Paris
- Paladin Energy Ltd. (2013): *Kayelekera – Malawi: Geology & Resources*. <http://www.paladinenergy.com.au/kayelekera-malawi-geology> (1.10.2013)
- Princep, D.; Hutson, A. (2010): *Langer Heinrich, Namibia: Mineral Resource and Mineral Reserve Estimation (Technical Report)*. Paladin Energy Ltd., Swakopmund
- Prognos AG (2009): *Renaissance der Kernenergie? Analyse der Bedingungen für den weltweiten Ausbau der Kernenergie gemäß den Plänen der Nuklearindustrie und den verschiedenen Szenarien der Nuklearenergieagentur der OECD*. Berlin/Basel
- Puritch, E.; Rodgers, K.; Sutcliffe, R. (2014): *Resource estimate and Preliminary Economic Assessment on the Viken MMS Project*. Technical Report Nr. 283, o. O.
- Riccitiello, D.; Robinson, P.; Hector, A.; Luis, J.; Benavides, D.; Hancock, D. (1979): *Uranium mining & milling – a primer*. In: *The Workbook 4 (6 & 7)*. Southwest Research & Information Center, Albuquerque
- Rio Tinto (2013): *2012 Annual report*. London
- Rössing Uranium Limited (2007): *2006 Report to stakeholders*. Swakopmund
- Rössing Uranium Limited (2010): *2009 Report to stakeholders. Investing in our future*. Swakopmund



- Rössing Uranium Limited (2013): Annual environmental report 2013. <http://www.rossing.com/files/reports-research/Rossing%20Uranium%20Environmental%20Report%202013.pdf> (13.5.2015)
- Rudnick, R.L.; Gao, S. (2005): Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D.; Turekian, K. (Hg.): The Crust. Treatise on Geochemistry 3, S. 1–64
- Schneider, ; Sailor, (2008): ???
- Schwochau, K. (1979): Uran aus Meerwasser. In: Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium 27(9), S. 563–567
- Shindondola-Mote, H. (2009): Uranium mining in Namibia: The mystery behind »low-level radiation«. Windhoek
- Singer, ; von Brevern, (2010): ???
- Sholly, S.C. (2013): Advanced Nuclear Power Plant Concepts and Timetables for Their Commercial Deployment. EHNUR Final Report – Workpackage 4. Wien
- Sovacool, B.K. (2008): Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. In: Energy Policy 36(8), S. 2950–2963
- Statista (2013): World uranium production in 2011 and 2012, by mining method (in metric tons). <https://www.statista.com/statistics/202358/world-uranium-mine-production-by-method/> (5.1.2013)
- Storm van Leeuwen, J.W. (2012): Nuclear power, energy security and CO₂ emission. revised draft. Chaam, <https://www.stormsmith.nl/Media/downloads/nuclearEsecurCO2.pdf> (15.7.2014)
- Storm van Leeuwen, J.W.; Smith, P.B. (2007): Nuclear power – the energy balance. <https://www.stormsmith.nl/Media/downloads/partD.pdf> (15.7.2013)
- Sugo, T. (2005): Uranium recovery from seawater. Takasahi Radiation Chemistry Research Establishment. <http://www.jaea.go.jp/jaeri/english/ff/ff43/topics.html> (15.7.2013)
- Swakop Uranium (2013): Husab Uranium Project. <http://swakopuranium.com/ob-husab-overview.php> (10.10.2013)
- Tabushi, I; Mieztis, Y.; Nishiya, T (1979): Extraction of Uranium from seawater by polymer-bound macrocyclic hexacetone. In: Nature 280, S. 665–666
- Tamada, M (2009): Current Status of Technology for Collection of Uranium From Seawater. Takasaki
- Hartman, A. (2008): Roessing pushing for 2030. The Namibian vom 29.8., <https://www.namibian.com.na/index.php?id=41832&page=archive-read> (3.1.2014)
- Uranium One Inc. (2010a): Management's discussion and analysis. Q2 2010. Toronto
- Uranium One Inc. (2010b): Management's discussion and analysis 2009. Toronto
- Uranium One Inc. (2012): Mining Operations. <http://uranium1.com/index.php/en/mining-operations> (21.5.2013)
- U.S. EIA (U.S. Energy Information Administration) (2010): 2009 Domestic Uranium Production Report. Washington
- U.S. EIA (2013): 2012 Domestic Uranium Production Report. Washington
- U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2011): The Legacy of Abandoned Uranium Mines in the Grants Mineral Belt, New Mexico. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/uranium-mine-brochure.pdf> (8.5.2015)
- Valliant, W.W.; Agnerian, H.; Bergen, R.D.; Wiatzka, G. (2010): Technical Report on the Preliminary Assessment of the Akbastau Uranium Project, Kazakhstan. NI 43-101 Report, Toronto



- Veit, S.; Srebotnjak, T. (2010): Potential use of radioactively contaminated mining materials in the construction of residential homes from open pit Uranium mines in Gabon and Niger. Brüssel
- Waggit, P. (2007): Uranium mining legacy sites and remediation – a global perspective. <http://studylib.net/doc/11383631/uranium-mining-legacy-sites-and-remediation---a-global-pe...> (20.12.2013)
- Wagner, H.; Koch, M.; Burkhardt, J.; Große Böckmann, T.; Feck, N.; Kruse, P. (2007): CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. In: BWK 59(10), S. 44–52
- WISE (World Information Service on Energy Uranium Project) (2011a): Namibia – General. <http://www.wise-uranium.org/umopafr.html#NA> (20.9.2013)
- WISE (2011b): Issues at Rössing Uranium Mine, Namibia. <http://www.wise-uranium.org/umoproe.html> (20.9.2013)
- WISE (2011c): New Uranium Mining Projects – Europe – Ukraine. <http://www.wise-uranium.org/upeur.html#UA> (20.12.2013)
- WISE (2011d): New Uranium Mining Projects – Namibia. <http://www.wise-uranium.org/upna.html> (20.12.2013)
- WISE (2011e): New Uranium mining projects – Uzbekistan. <https://www.wise-uranium.org/upuz.html> (20.12.2013)
- WISE (2011f): Uranium Mine Ownership – Asia – China. <http://www.wise-uranium.org/uoasi.html#CN> (20.12.2013)
- WISE (2013a): New Uranium Mining Projects – Namibia: Trekkopje. <http://www.wise-uranium.org/upnatrk.html> (20.12.2013)
- WISE (2013b): New Uranium Mining Projects – South/Central America – Brazil. <http://www.wise-uranium.org/upsam.html#BR> (20.12.2013)
- Wismut GmbH (2014): Die Wismut GmbH. <http://www.wismut.de/de/> (1.2.2014)
- WNA (2009): The Global Nuclear Fuel Market – Supply and demand 2007-2030. London
- WNA (2011a): The Global Nuclear Fuel Market – Supply and demand 2011-2030. London
- WNA (2011b): Uranium and Nuclear Power in Kazakhstan. <http://www.world-nuclear.org/info/inf89.html> (14.7.2011)
- WNA (2012): Supply of Uranium: The Sustainability of Mineral Resources. <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Supply-of-Uranium>. (20.5.2013)
- WNA (2013a): Energy Analysis of Power Systems. <http://world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Energy-Analysis-of-Power-Systems/> (20.12.2013)
- WNA (2013b): Nuclear Power in South Africa. <http://world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Africa/> (16.9.2013)
- WNA (2013c): Nuclear Power in Ukraine. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/> (16.9.2013)
- WNA (2013d): Russia's Nuclear Fuel Cycle. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia--Nuclear-Fuel-Cycle> (27.5.2013)
- WNA (2013e): Uranium and Nuclear Power in Kazakhstan. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Kazakhstan/> (20.5.2013)
- WNA (2013f): Uranium in Canada. <http://www.world-nuclear.org/info/country-profiles/countries-a-f/canada-uranium.aspx> (25.5.2013)
- WNA (2013g): Uranium in Mongolia. <http://world-nuclear.org/info/country-profiles/countries-g-n/mongolia.aspx> (16.9.2013)



- WNA (2013h): Uranium in Niger. <http://world-nuclear.org/info/country-profiles/countries-g-n/niger.aspx> (25.5.2013)
- WNA (2013i): Uranium production figures, 2002–2012. <http://world-nuclear.org/info/facts-and-figures/uranium-production-figures.aspx> (29.8.2013)
- WNA (2013j): World Uranium Mining Production. <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Mining-of-Uranium/World-Uranium-Mining-Production/> (3.9.2013)
- WNN (World Nuclear News) (2009): Brazil to start enriching uranium at Resende. <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=24321> (20.9.2013)
- WNN (2010): Resource boost at Rössing South. http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Resource_boost_at_Rossing_South-1108104.html (10.1.2013)
- WNN (2011): Olympic Dam expansion gets environmental approvals. http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Olympic_Dam_expansion_gets_environmental_approvals-1010114.html (25.10.2014)
- WNN (2012): Olympic Dam held back. http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Olympic_Dam_held_back_2208121.html (25.10.2014)
- WNN (2013a): Environmental approval for Four Mile uranium project. http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Final_environmental_OK_for_Four_Mile-1608134.html (10.10.2014)
- WNN (2013b): Megatons to Megawatts program concludes. <http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Megatons-to-Megawatts-program-concludes-1112134.html> (1.10.2014)
- WNN (2013c): Russia completes Megatons to Megawatts work. http://www.world-nuclear-news.org/ENF-Russia_completes_Megatons_to_Megawatts_work-2908134.html (1.10.2014)
- Yates M.V.; Brierley J.A.; Brierley, C.; Folling S. (1983): Effect of microorganisms on in situ Uranium mining. In: *Applied and Environmental Microbiology* 46(4), S. 779–784
- Yue, Y.; Mayes, R.T.; Kim, J.; Fulvio, P.; Sun, X.; Tsouris, C.; Chen, J.; Brown, S.; Dai, S. (2013): Seawater Uranium Sorbents: Preparation from a Mesoporous Copolymer Initiator by Atom-Transfer Radical Polymerization. In: *Angewandte Chemie International Edition* 52(50), S. 13458–13462
- Zittel, W.; Arnold, N.; Liebert, W. (2013): Nuclear fuel and availability. EHNUR WP 6, Wien u.a.O.
- Zittel, W.; Schindler, J. (2006): Uranium Resources and Nuclear Energy. Energy Watch Group, Berlin





6 Anhang

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Uranvorkommen in Abhängigkeit vom Cut-off-Grad	21
Abb. 2.1	Schematisches Profil durch ein kontinentales Becken mit Grundwasserstrom entlang eines topografischen Gradienten	26
Abb. 2.2	Entwicklung der Produktion nach Abbaumethode	28
Abb. 2.3	Historische Uranproduktion und ziviler Bedarf für Leistungsreaktoren	35
Abb. 2.4	Uranproduktion nach Ländern 2012	36
Abb. 2.5	Entwicklung des Uranpreises	37
Abb. 3.1	Uranvorkommen und Einteilung in Ressourcenkategorien	40
Abb. 3.2	Entwicklung des globalen Ressourcenstands von 1999 bis 2011	49
Abb. 3.3	20-jährige Entwicklung der Produktionszahlen in Kasachstan	55
Abb. 3.4	Jahresproduktion der größten Uranminenprojekte in Südafrika	61
Abb. 3.5	Historische Produktionsmengen in den USA	63
Abb. 3.6	Produktion der Rössing-Mine	71
Abb. 3.7	Entwicklung der verbleibenden wirtschaftlichen Uranressourcen in Australien, Kanada und der Welt (1940 bis 2009)	79
Abb. 3.8	Kumulative Explorationsausgaben und bekannte RAR und IR	80
Abb. 3.9	Jährliche Uranexplorationsausgaben und Ressourcenabschätzungen	81
Abb. 3.10	Zeitspanne zwischen der Entdeckung einer Lagerstätte und der Inbetriebnahme der Minen	83
Abb. 3.11	Anreicherungsaufwand in SWU für eine Wiederanreicherung auf 0,71 % bezogen auf eine Einheit Uranfeed abgereicherten Urans mit 0,4 % U-235-Gehalt, aufgetragen über die erreichte Abreicherung des neuen Abfallstroms	92
Abb. 3.12	Überblick über die bis 2030 verfügbaren sekundären Ressourcen	96
Abb. 4.1	Geschichte und Prognose der Uranproduktion	100
Abb. 4.2	Vergleich zwischen prognostiziertem Bedarf an Uran (Red Book »Low Case«/»High Case«) und zur Verfügung stehendem Uran aus bestehenden und geplanten Minen	102
Abb. 4.3	Darstellung von kumulierten, kombinierten Produktionsprognosen und Bedarfsprognosen für Uran im Zeitraum 2010 bis 2030	106
Abb. 4.4	CO ₂ -Emission je produzierte t U ₃ O ₈ für ausgewählte Uranminen	111



Abb. 4.5	Veränderung der landesdurchschnittlichen Urangehalte in primären, konventionellen Uranlagerstätten der wichtigsten Förderländer seit 1945	112
Abb. 4.6	Exponentielle Abnahme in der Menge an extrahierbarem Uran bei abnehmendem Urangehalt im Erz	113
Abb. 4.7	Der Energieverbrauch der Gewinnung von Uran aus der Erdkruste als Funktion des Erzgehalts	114

6.2 Tabellenverzeichnis

Tab. Z.1	Bedarfsszenarien für Uran pro Jahr	16
Tab. 3.1	Stand der verhältnismäßig gesicherten Ressourcen (1.1.2011)	43
Tab. 3.2	Stand der identifizierten Ressourcen (1.1.2011)	44
Tab. 3.3	Vergleich der gesamten Uranressourcen nach Ländern	46
Tab. 3.4	Kennzahlen Australien	51
Tab. 3.5	Kennzahlen Brasilien	52
Tab. 3.6	Kennzahlen China	53
Tab. 3.7	Kennzahlen Kanada	54
Tab. 3.8	Kennzahlen Kasachstan	56
Tab. 3.9	Minen in Kasachstan	56
Tab. 3.10	Kennzahlen Malawi	57
Tab. 3.11	Kennzahlen Namibia	58
Tab. 3.12	Kennzahlen Niger	59
Tab. 3.13	Kennzahlen Russland	60
Tab. 3.14	Kennzahlen Südafrika	61
Tab. 3.15	Kennzahlen Ukraine	62
Tab. 3.16	Kennzahlen USA	64
Tab. 3.17	Kennzahlen Usbekistan	64
Tab. 3.18	Kennzahlen Lagerstätte Olympic Dam	66
Tab. 3.19	Kennzahlen Lagerstätte Cigar Lake	67
Tab. 3.20	Kennzahlen Lagerstätte Inkai (Blöcke 1 bis 3)	68
Tab. 3.21	Kennzahlen Lagerstätte Inkai South (Block 4)	69
Tab. 3.22	Kennzahlen Lagerstätte Rössing	71
Tab. 3.23	Kennzahlen Lagerstätte Vaal River (diverse)	72

6.3 Abkürzungen

cm, m, m ³	Zentimeter, Meter, Kubikmeter
CO ₂ (e)	Kohlenstoffdioxid(äquivalent)
g, kg	Gramm, Kilogramm



HEU	Highly enriched Uranium (hochangereichertes Uran)
IOCG	Iron Oxide Copper-Gold (Eisenoxid-Kupfer-Gold)
IR	Inferred Resources (vermutete Ressourcen)
ISL	In-situ-Leaching (Auslaugungsverfahren)
kWh	Kilowattstunde
GW _{el}	Gigawatt installierte Leistung
LEU	Low-enriched Uranium (niedrig/schwach angereichertes Uran)
Mio., Mrd.	Million, Milliarde
MOX	Uran-Plutonium-Mischoxid
PJ	Petajoule
ppm	Parts per Million, 1 ppm = 0,0001 %, 1.000 ppm = 0,1 %
RAR	Reasonably assured Resources (verhältnismäßig gesicherte Ressourcen)
SWU	Separative Work Unit (Trennarbeit)
t, kt, Mt	Tonne, Kilotonne, Megatonne
(WA-)Ura	(wiederaufgearbeitetes) Uran
U*	Natururanäquivalent
U-235/236	Uraniumisotop mit 235/236 Nukleonen
U ₃ O ₈	Triuranooxid, chemische Verbindung des Urans, 1 kg U = 1,179 kg U ₃ O ₈
UDEPO	Uranium Deposits and Resources Data Base
UF ₆	Uranhexafluorid

6.4 Glossar

Anreicherung: In Natururan ist der Anteil des thermisch spaltbaren U-235 etwa 0,71 %. Bei der Anreicherung fallen Abfallmengen mit geringerem Anteil an U-235 an. Es entsteht abgereichertes Uran (in der Regel 0,2 bis 0,4 % U-235-Anteil). Niedrig/schwach angereichertes Uran (LEU) mit typischerweise 3 bis 5 % U-235, das in Anreicherungsanlagen produziert wird, findet als Brennstoff in Leistungsreaktoren Verwendung.

Cut-off-Grad: minimaler Metallgehalt (hier Uran) im Erz, ab dem das Gestein in einer Lagerstätte als profitabel abbaubar gilt. Dieser Mindestgehalt, bei dem sich der Abbau einer Lagerstätte noch lohnt, hängt dabei unter anderem von der Qualität des Rohstoffs, erwarteten Produktionskosten, betriebswirtschaftlichen und politischen Faktoren ab. Ein Kriterium kann auch der energetische Aufwand sein, der für den Abbau nötig wird.

erzhöflich: besitzt Potenzial für abbauwürdige Erzvorkommen.

Gewinnungsfaktor: Der Anteil von Uran, der aus dem gesamten im Erz beinhaltenen U bergbaulich gewonnen werden kann (Ausbeute). Er unterscheidet sich nach Abbaumethode und Erzgehalt und liegt typischerweise zwischen 70 % und 95 %.

hochgradig/niedriggradig: Die Erzkonzentration in Uranlagerstätten, an denen abgebaut wird, liegt derzeit zwischen 0,02 und 20 %, also innerhalb einer Spanne von einem Faktor 1.000, wobei der Großteil der Minen im Bereich unter 0,2 % arbeitet.



Es gibt keine einheitliche Definition für hoch- oder niedriggradig. Tendenziell wären Erzkonzentrationen jenseits von 1 % als hochgradig, unter 0,1 % als niedriggradig zu klassifizieren.

Oxidationsstufe: Ionenladung eines Atoms innerhalb einer chemischen Verbindung, die vorläge, wenn die Verbindung aus einatomigen Ionen bestünde

Pyrit: ein häufig vorkommendes Mineral bestehend aus Schwefel und Eisen.

Redoxfalle: Grenze zwischen oxidierendem und reduzierendem Gesteinsmilieu, an dem Uran ausgefällt wird. Bei Rollfrontlagerstätten ist das reduzierte Milieu durch organische Komponenten (Pflanzenreste) oder Pyrit gegeben.

Schwerwasserreaktor: ein Reaktor, der für den Betrieb auf schweres Wasser angewiesen ist, dafür jedoch mit nicht oder nur wenig angereichertem Uran betrieben werden kann.

Tailings: Abfallprodukte, die bei der Gewinnung von Metallen in Minen anfallen.

Uraninit: auch Pechblende genannt. Ein uranhaltiges Mineral mit der chemischen Formel UO_2

Uranisotope: Nuklide gleicher Protonenzahl (also desselben Elements) mit unterschiedlicher Neutronenzahl. In natürlich vorkommendem Uran finden sich 99,27 % U-238, 0,71 % U-235 und 0,0055 % U-234. Die natürlichen vorkommenden Uranisotope haben dementsprechend 92 Protonen und 146, 143 bzw. 142 Neutronen.

Wiederaufbereitung: Abtrennung von nichtverbranntem (nichtgespaltenem) Uran (und Plutonium) aus verbrauchten, abgebrannten Reaktorbrennelementen.

Yellowcake: Als Yellowcake wird im Allgemeinen das Endprodukt einer Uranverarbeitungsanlage bezeichnet, obwohl dies nicht mehr gelb ist. Die gelbe Färbung tritt in einem Zwischenschritt der Produktion auf. Der Hauptbestandteil ist Triuranooctoxid (U_3O_8).



**BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG**

Karlsruher Institut für Technologie

Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de
Twitter: @TABundestag