



Reichweite der Uran-Vorräte der Welt

Erstellt für Greenpeace Deutschland

Autor: Peter Diehl

Berlin, Januar 2006

Inhalt

	Seite
A.Uran-Vorräte.....	5
1.Primäre Vorräte (d.h. in Lagerstätten).....	5
a.Übersicht.....	5
b.Marginale Uran-Lagerstätten.....	12
Nebenmineral zu Gold.....	12
Nebenmineral zu Kupfer.....	12
Nebenmineral zu Phosphat.....	12
Schwarzschiefer.....	13
Uran in Meerwasser.....	13
2.Sekundäre Vorräte (d.h. andere Vorräte als in geologischen Lagerstätten).....	14
a.Uran-Gewinnung aus alten tailings	14
b.Wiederaufarbeitungsuran (RepU)	14
c.Gestrecktes HEU	15
d.Uran aus Lagerbeständen von LEU, Unat.....	18
e.Uran aus Wiederanreicherung von abgereichertem Uran	18
3.Ersatz von Uran.....	21
a.Plutonium (MOX-Brennstoff).....	21
b.Thorium.....	23
4.Kombinierte Daten der Uran-Vorräte.....	23
5.Einflussfaktoren auf die Uran-Vorräte.....	23
Ausbeute beim Bergbau von Abbautechnologie abhängig.....	24
Uran-Angebot steigt mit dem Preis.....	24
Die Gewinnung von Uran als Nebenprodukt ist abhängig von der des Hauptprodukts.....	24
Neue Uran-Vorräte können durch Exploration gefunden werden.....	24
Politische Opposition gegen neue Uran-Bergwerke.....	24
Auswirkung von Anreicherungskosten und tails assay.....	25
Politische Opposition gegen MOX-Brennstoff.....	25
Verfügbarkeit von HEU unterliegt politischen Entscheidungen.....	25
Verfügbarkeit von überschüssigen Anreicherungskapazitäten für die Wiederanreicherung von tails.....	25
Unsicherheit über Lagerbestände.....	26
B.Auswirkungen des Uran-Bergbaus auf die Umwelt.....	27
1.Übersicht über die Umweltauswirkungen.....	27
a.Uran-Bergwerke.....	27
b.Abfallgestein.....	28
c.Haldenlaugung.....	28
d.Lösungsbergbau (in-situ leaching).....	28
e.Aufbereitung des Erzes.....	29
f.Deponien für Uranerz-Aufbereitungsrückstände (tailings).....	30
Eigenschaften der Uranerz-Aufbereitungsrückstände.....	30
Gefahrenpotential von Uranerz-Aufbereitungsrückständen.....	31
2.Sanierung von Uran-Bergwerken.....	33
Bergwerke und Abfallgestein.....	33
In-situ leaching.....	33
Uranerz-Aufbereitungsrückstände.....	33
Sanierungskosten.....	35
3.Typische Fallbeispiele früheren Uran-Bergbaus.....	35
4.Typische Fallbeispiele von aktiven Uran-Bergwerken.....	36

C. Bestehende und geplante technische Kapazitäten.....	38
1. Uran-Bergbau.....	38
a. Übersicht.....	38
b. Aktuelle Entwicklungen.....	39
Konventioneller Bergbau - d.h. Bergbau untertage und im Tagebau.....	39
In-situ leach (ISL) Produktion.....	40
2. Konversion zu UF ₆	41
3. Anreicherung.....	41
4. Herstellung von Nuklearbrennstoff.....	43
5. Kombinierte Daten zu Kapazitäten.....	45
6. Einflussfaktoren auf Produktionskapazitäten.....	46
Risiken aufgrund der Abhängigkeit von einer kleinen Zahl großer Produzenten.....	46
Risiken aufgrund des hohen Anteils sekundärer Quellen.....	46
Auslaufen der sekundären Quellen erfordert Erhöhung der primären Produktion.....	46
Lange Vorlaufzeiten für die Inbetriebnahme neuer Bergwerke.....	46
Neue Kapazitäten sind überwiegend nur auf Armerzlagerstätten möglich.....	46
D. Uran-Angebot und Nachfrage.....	47
1. Uran-Lieferanten.....	47
2. Uran-Abnehmer.....	50
3. Uran-Handel.....	53
4. Nachfrageszenarien.....	54
Höherer Brennstoffabbrand.....	54
Ausstieg aus der Atomenergienutzung in Schweden und Deutschland.....	55
Pläne für eine Erweiterung der Atomenergienutzung in China.....	55
Schnelle Brutreaktoren?	55
5. Reichweite der Uran-Vorräte.....	55
6. Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage.....	60
7. Handelsbeschränkungen.....	62
a. Exportbeschränkungen.....	62
...zwingen Indien, marginale Lagerstätten abzubauen.....	62
...verhindern den Uran-Export von Australien nach China.....	63
...behindern die Wiederanreicherung von Uran in Russland.....	63
b. Importbeschränkungen.....	63
8. Uran-Preis.....	64
E. Schlussfolgerungen.....	66
Bekannte Uran-Vorräte können steigenden Bedarf nicht decken.....	66
Uran-Bergbau-Kapazitäten reichen nicht aus.....	66
Zunahme der Umweltfolgen.....	66
Regionale Ungleichgewichte bei Angebot und Nachfrage.....	66
Steigende Kosten.....	66
Vorgeschlagene Alternativen hochproblematisch.....	67
F. Glossar.....	68
1. Begriffe und Abkürzungen.....	68
2. Umrechnungsfaktoren.....	71
G. Literatur.....	72

Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt die zugänglichen Informationen über die aktuelle Situation zu Vorräten, Angebot und Nachfrage von Uran zusammen und analysiert Faktoren, die das Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage beeinflussen. Er stellt für verschiedene Szenarien Schätzungen über die mögliche Reichweite der bekannten Uran-Vorräte vor und beleuchtet die Umweltauswirkungen solcher Szenarien.

Der Bericht kommt zu dem Schluss, dass die bekannten Uran-Vorräte nur einen nahezu gleichbleibenden Bedarf decken können, der nach 2040 wegen eines weltweiten Ausstiegs aus der Atomenergie zurückgeht. Jeglicher deutliche Anstieg der Nachfrage würde zu einer vorzeitigen Erschöpfung der bekannten Vorräte führen und den Abbau von immer ärmeren Lagerstätten erfordern, was zu steigenden Umweltbelastungen führen würde. Insbesondere reichen die bekannten Uran-Vorräte keinesfalls aus, um alle fossilen Brennstoffe in der Stromerzeugung zu ersetzen.

Das Aufrechterhalten eines Gleichgewichts zwischen Angebot und Nachfrage wird wegen regionaler Unterschiede noch erschwert. Wichtige Abnehmerländer sowie aufstrebende Mächte wie China und Indien, verfügen nur über unbedeutende eigene Uran-Lagerstätten; Russland wird bereits in zehn Jahren vor einer schweren Versorgungskrise stehen. Jedweder Uran-Handel mit diesen Ländern wäre aber problematisch, da eine friedliche Nutzung des Urans nicht sichergestellt ist.

Einleitung

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde Uran zunächst als strategisch wichtiger Rohstoff abgebaut. Man unternahm riesige Anstrengungen, um an dieses Ausgangsmaterial für die Atombombe heranzukommen, ohne Rücksicht auf die Kosten und anfangs auch, ohne Rücksicht auf die Gesundheit der beteiligten Arbeiter oder die Umwelt zu nehmen. Die USA erhielten ihr Uran aus verschiedenen Quellen, vorwiegend aus heimischen und kanadischen Lagerstätten. Die Sowjetunion hatte zunächst kaum Kenntnisse über Lagerstätten im eigenen Land und baute daher eine riesige Uran-Bergbauindustrie in ihren europäischen Satellitenstaaten auf, insbesondere in Ostdeutschland und der Tschechoslowakei, aber auch in Ungarn und Bulgarien. Es gab Zeiten, in denen über 100.000 Menschen unter harten Bedingungen bei der Wismut so viel Uran abbauten, wie ihn heute wenige hundert Menschen in einer der kanadischen Reicherzlagerstätten zutage fördern.

Als Uran in den siebziger Jahren immer mehr zu einem kommerziellen Rohstoff wurde, begann sich die Situation zu ändern. Aber erst das Ende des Kalten Krieges im Jahr 1989 brachte das Ende für die riesigen Uran-Bergwerke, die in Europa immer noch für die Sowjetunion arbeiteten. Da keine Rückstellungen gemacht worden waren, mussten die jeweiligen Regierungen die Verantwortung für die Stilllegung und Sanierung der Hinterlassenschaften übernehmen, eine Aufgabe, die noch im Gange ist, bei der aber in der Zwischenzeit schon beachtliche Fortschritte erzielt worden sind.

Mit dem Ende des Kalten Krieges war auch Schluss mit der militärischen Nachfrage nach Uran. Sekundäre Quellen wie Lagerbestände oder gestrecktes Bombenmaterial wurden verfügbar. Diese sekundären Quellen decken derzeit fast die Hälfte des Bedarfs, und sie lassen nur den wirtschaftlichsten Bergwerken eine Überlebenschance. Zu diesen gehören solche auf Reicherzlagerstätten wie in Saskatchewan, Kanada, auf großen kostengünstig abzubauenen Armerzlagerstätten wie Rössing in Namibia bzw. Lagerstätten, bei denen Uran nur Nebenprodukt ist, wie Olympic Dam in Australien sowie Lösungsbergbau (in-situ leaching) in verschiedenen Teilen der Welt.

Mit dem absehbaren Ende der sekundären Vorräte und angesichts der Vorschläge zum Ausbau der Stromerzeugung aus Atomenergie in verschiedenen Ländern, verändert sich die Situation erneut: Uran könnte wieder ein knapper Rohstoff werden. Der kürzlich zu beobachtende scharfe Anstieg des Uranpreises auf dem Spotmarkt zeigt, wie ernst man solche Befürchtungen nehmen muss.

A. Uran-Vorräte

1. Primäre Vorräte (d.h. in Lagerstätten)

a. Übersicht

Die Erdkruste enthält Uran in einer durchschnittlichen Konzentration von drei Gramm pro Tonne (0,0003%). Höhere Konzentrationen haben sich in vielen Lagerstätten in verschiedenen Teilen der Welt angesammelt. Diese Lagerstätten zeigen große Unterschiede in geologischer Situation, Größe, Uran-Konzentration und Eignung zum Abbau.

Uran-Lagerstätten werden allgemein in Kategorien entsprechend der Zuverlässigkeit eingeteilt, mit der ihr Uran-Inhalt bekannt ist (reasonably assured resources - RAR, estimated additional resources category I und II - EAR I / EAR II und speculative resources - SR) und entsprechend der erwarteten Abbaukosten (bis zu 40, 80 und 130 US\$ pro kg U) (siehe Tab. 1 und Abb. 1 - Abb. 3).

Anmerkung: Diese Kostenkategorien sind in US\$/kg Uran angegeben, während der Uran-Preis gewöhnlich in US\$/lb U_3O_8 angegeben wird. Da ein Kilogramm Uran äquivalent ist zu 2,6 lb U_3O_8 (siehe Glossar S. 72), entsprechen diese Preiskategorien 15,38 US\$, 30,77 US\$ und 50,00 US\$ pro lb U_3O_8 .

Zum Vergleich: Der niedrigste Spotmarkt-Preis für Uran wurde Ende 2000 mit etwa sieben US\$/lb U_3O_8 erreicht, während der aktuelle Spotmarkt-Preis 37,50 US\$/lb U_3O_8 beträgt (Stand 30. Januar 2006).

Die bekannten Vorräte in den Kategorien RAR + EAR I, die zu Kosten bis zu 130 US\$/kg Uran abbaubar sind, betragen etwa 4,59 Mio. Tonnen Uran. [NEA 2004] nennt weiterhin „nicht entdeckte“ Vorräte von 2,25 Mio. Tonnen Uran als EAR II und 4,44 Mio. Tonnen Uran als SR, die zu Kosten bis zu 130 US\$/kg Uran abbaubar sein sollen, und weitere 3,1 Mio. Tonnen Uran als SR ohne ausgewiesene Kostenangabe; wegen ihrer Unbestimmtheit werden diese Kategorien hier jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Ein erster Blick auf die Weltkarte in Abb. 1 scheint eine ziemlich gleichmäßige Verteilung der Uran-Vorräte über die Welt anzuzeigen - anders als bei vielen anderen Rohstoffen. Es wird jedoch auch deutlich, dass nur wenige Länder über den Löwenanteil an den bekannten Uran-Vorräten verfügen, vor allem, wenn man die Vorräte betrachtet, die zu niedrigen Kosten abbaubar sind.

Da die in Tab. 1 benutzten Kategorien die Lagerstätten und insbesondere die Umweltauswirkungen ihres Abbaus nur ziemlich unzureichend beschreiben, wird hier der Versuch unternommen, die *Uran-Konzentration* in den Lagerstätten als Indikator zu benutzen. Während die Uran-Konzentrationen der derzeit abgebauten Lagerstätten den Bereich von 0,029% bis 17,96% Uran umfasst (das ist eine Spanne von 1:600!), umfassen die Kategorien für die Abbaukosten gerade einmal eine Spanne von etwas über 1:3. Die Uran-Konzentration im Erz korreliert zwar nicht direkt mit den Umweltfolgen des Abbaus, sie gibt aber doch einen guten Hinweis auf die Größe des nötigen Bergwerks und – bei konventionellen Bergwerken – auf die Größe der zugehörigen Deponien mit den Uranerz-Aufbereitungsrückständen.

Tab. 2 listet die bedeutenderen Uran-Lagerstätten auf, für die die Uran-Konzentration bzw. der gesamte Uran-Inhalt in [WUP HP] aufgeführt sind. Die angeführten Zahlen sind jedoch aus einer ganzen Reihe von Gründen nicht besonders zuverlässig: Zum einen gibt es unterschiedliche Methoden, den Gesamt-Uran-Inhalt und die Uran-Konzentration einer Lagerstätte anzugeben, und es ist oft unklar, wie die Zahl zustande kam; außerdem sind einige Zahlen überholt, da der

Vorrat zu einem bestimmten Zeitpunkt angegeben wurde, sich inzwischen aber durch Abbau oder z.B. durch eine Neubewertung verändert hat. Immerhin können die zusammengestellten Zahlen aber einen ersten Hinweis geben.

Anmerkung: Die Uran-Konzentrationen sind in %U angegeben, während Bergbaufirmen dazu neigen, die eindrucksvollere Angabe in %U₃O₈ zu bevorzugen. Ein % U₃O₈ ist äquivalent zu 0,848% Uran. Außerdem sind die Vorräte in Tonnen Uran angegeben, während Bergbaufirmen gerne Angaben in lb U₃O₈ machen. Eine Mio. lbs U₃O₈ ist äquivalent zu 385 Tonnen Uran.

Zur leichteren Übersicht wurden die Uran-Konzentrationen in die folgenden gewählten Kategorien eingeteilt:

- **sehr hoch (> 10%U):** Zurzeit sind solche Konzentrationen nur von den Lagerstätten McArthur River und Cigar Lake in Saskatchewan, Kanada, bekannt. Diese Konzentrationen sind sogar zu hoch, um das Erz im konventionellen Aufbereitungsprozess verarbeiten zu können. Deshalb mischt man die Erze zunächst mit schwächeren Erzen, um einen Uran-Gehalt von etwa vier Prozent zu erhalten, der dann für eine Aufbereitung geeignet ist. Die oben genannten Lagerstätten haben im Übrigen nicht nur hohe Uran-Konzentrationen, sondern enthalten auch sehr große Uran-Mengen. Früher waren solche hohen Uran-Gehalte nur von den berühmten Erzen aus dem damaligen Belgisch-Kongo bekannt, die im längst erschöpften Bergwerk Shinkolobwe abgebaut wurden.
- **hoch (1% - 10%U):** Nur sehr wenige Lagerstätten fallen in diesen Bereich, wie z.B. McClean Lake und Midwest in Saskatchewan, Kanada.
- **gut (0,2 - 1%U):** Typische Lagerstätten in diesem Bereich sind Ranger und Jabiluka in Australien, Arlit und Akouta in Niger, und Lagoa Real in Brasilien
- **mäßig (0,1 – 0,2%U):** Hunderte meist kleiner Lagerstätten in diesem Bereich waren lange Zeit die Hauptquelle für Uran in den USA, bevor der Uran-Markt Anfang der achtziger Jahre zusammenbrach: Einige davon werden in letzter Zeit nun wieder in Betrieb genommen. Daneben gibt es eine ganze Reihe größerer Lagerstätten in diesem Bereich in verschiedenen Teilen der Welt.
- **Niedrig (< 0,1%U):** Derzeit können Lagerstätten mit solchen niedrigen Uran-Gehalten nur bei Vorliegen besonderer Umstände wirtschaftlich abgebaut werden, wie z.B. einem riesigen Tagebaubetrieb im Falle von Rössing in Namibia. Oder es besteht die Möglichkeit, wie bei den kasachischen Lagerstätten, im Lösungsbergbau-Verfahren (in-situ leaching) zu arbeiten. Auch wenn Uran nur ein Nebenprodukt des Bergbaus ist, wie bei Olympic Dam in Australien und bei den südafrikanischen Lagerstätten, lohnt sich bei einem so geringen Uran-Gehalt der Abbau.

Die meisten der Lagerstätten, bei denen kein Uran-Gehalt angegeben ist, fallen vermutlich in die Kategorien „niedrig“ oder „mäßig“.

Abb. 4 fasst die Gesamtvorräte nach Uran-Gehalts-Kategorien zusammen. Es ist offensichtlich, dass fast drei Viertel der in Tab. 2 angeführten Vorräte in die Kategorien „niedrig“ oder „mäßig“ fallen.

Tab. 1: Primäre Uran-Vorräte der Welt, Stand 1.1.2003 [NEA 2004]

	RAR			EAR I		
	< 40\$/kgU	< 80\$/kgU	< 130\$/kgU	< 40\$/kgU	< 80\$/kgU	< 130\$/kgU
Algerien	NA	19500	19500	0	0	0
Argentinien	4780	4880	7080	2860	2860	8560
Australien	689000	702000	735000	276000	287000	323000
Brasilien	26235	86190	86190	0	57140	57140
Bulgarien	1665	5870	5870	1650	6300	6300
Kanada	297264	333834	333834	86560	104710	104710
Zentr.Afr.Rep.	NA	6000	12000	0	0	0
Chile	NA	0	560	NA	NA	885
China, Festland	26235	NA	35060	5890	14690	14690
Kongo, DR	NA	1350	1350	NA	1275	1275
Tschechien	0	830	830	0	90	90
Dänemark	0	0	20250	0	0	12000
Finnland	0	0	1125	0	0	0
Frankreich	0	0	0	0	0	9510
Gabun	0	0	4830	0	0	1000
Deutschland	0	0	3000	0	0	4000
Griechenland	1000	1000	1000	NA	6000	6000
Ungarn	0	0	0	0	0	13800
Indien	NA	NA	40980	NA	NA	18935
Indonesien	0	320	4620	0	0	1155
Iran	0	0	370	0	0	700
Italien	NA	4800	4800	0	0	1300
Japan	NA	NA	6600	0	0	0
Kasachstan	280620	384625	530460	131220	237780	317160
Malawi	NA	8775	8775	0	0	0
Mexiko	0	0	1275	0	0	525
Mongolei	7950	46200	46200	8250	15750	15750
Namibia	57262	139297	170532	57142	73560	87085
Niger	89800	102227	102227	125377	125377	125377
Peru	NA	1215	1215	NA	1265	1265
Portugal	NA	7470	7470	NA	1450	1450
Rumänien	0	0	3325	0	0	3608
Rußland	52610	124050	143020	15860	34260	121220
Slowenien	0	2200	2200	0	5000	10000
Somalia	0	0	4950	0	0	2550
Südafrika	119184	231664	315330	49313	66940	80340
Spanien	0	2460	4925	0	0	6380
Schweden	0	0	4000	0	0	6000
Thailand	0	0	5	0	0	5
Türkei	0	6845	6845	0	0	0
Ukraine	15380	34630	64660	900	4735	11410
USA	NA	102000	345000	0	0	0
Usbekistan	61510	61510	79620	31760	31760	38840
Vietnam	NA	NA	1005	NA	820	5435
Simbabwe	NA	1350	1350	0	0	0
Welt gesamt	1730495	2458152	3169238	792782	1078762	1419450

RAR = Reasonably Assured Resources, EAR I = Estimated Additional Resources - Category I

RAR + EAR I = bekannte Vorräte, NA = Nicht verfügbar

Anmerkung: Die Spalte "< 130\$/kgU" enthält auch Vorräte, die keiner Kostenkategorie zugewiesen wurden
Vorräte in Schwarzschiefer oder Phosphatvorkommen sind nicht berücksichtigt.

Abb. 1: Weltkarte der Reasonably Assured Resources

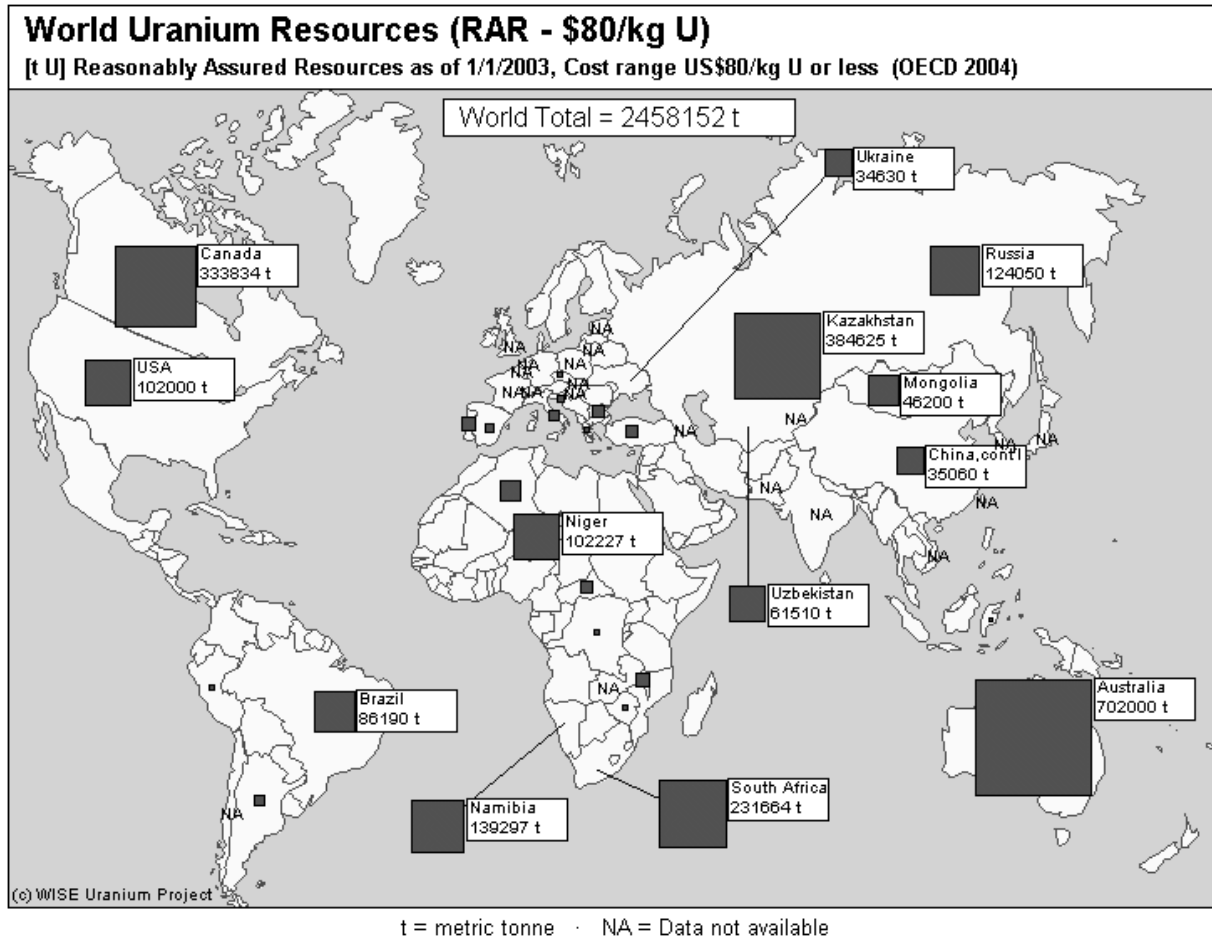


Abb. 2: Reasonably Assured Resources nach Ländern

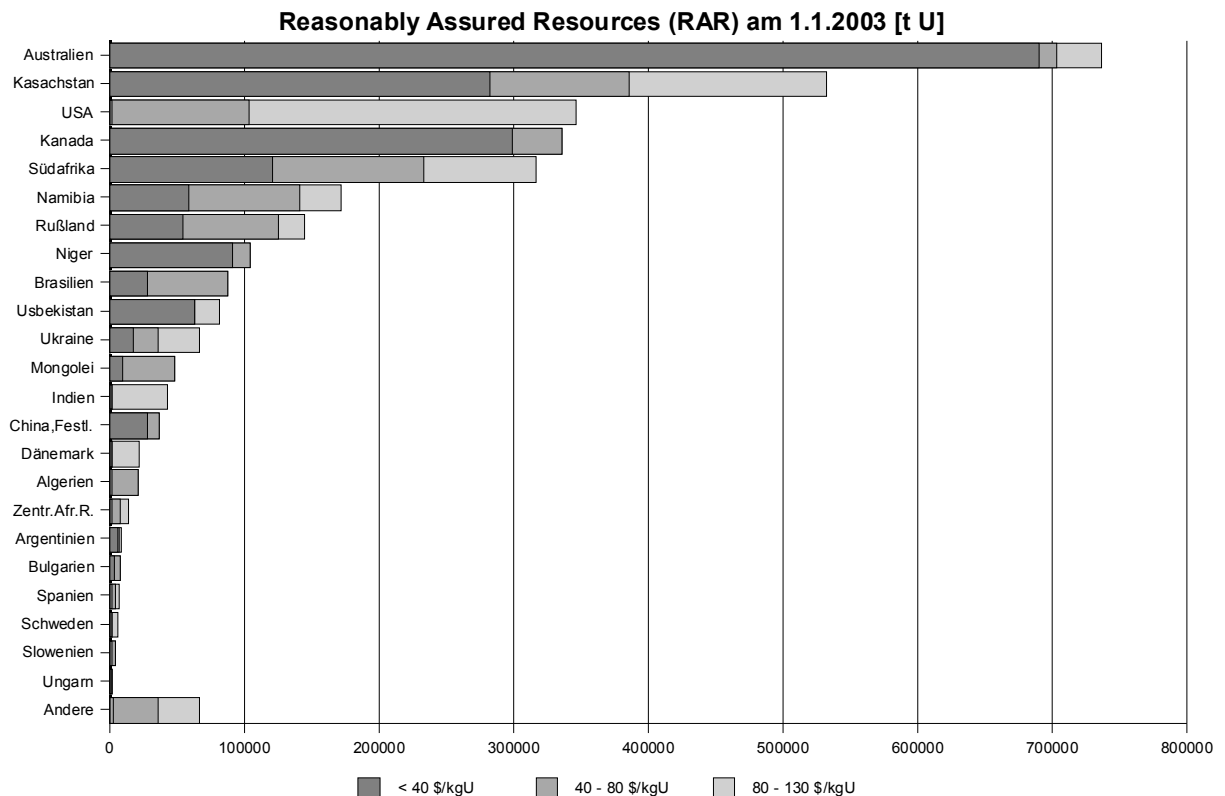


Abb. 3: Bekannte Vorräte nach Ländern

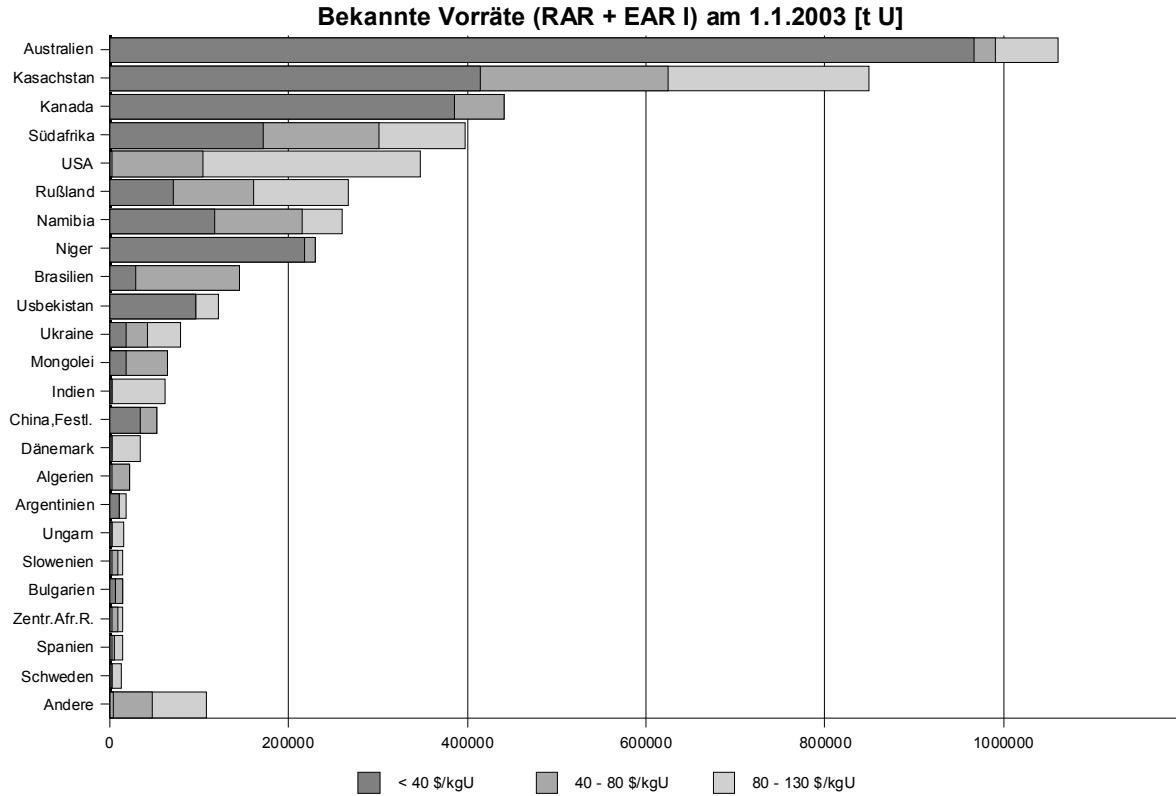
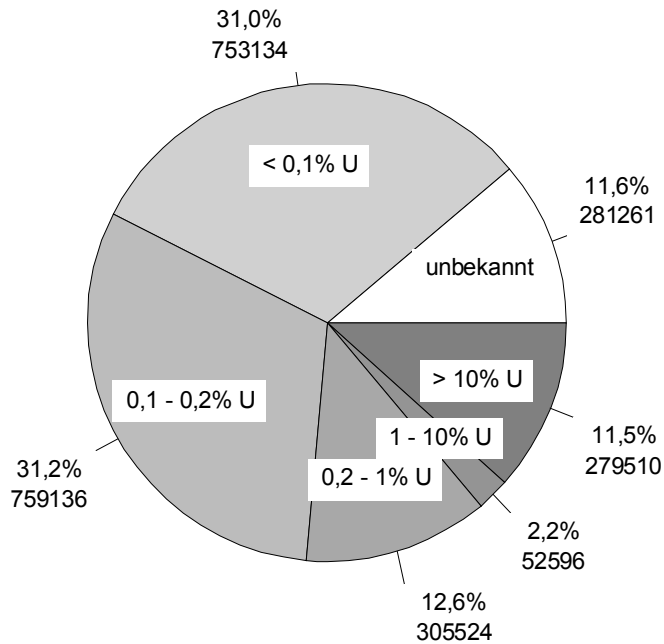


Abb. 4: Uran-Vorräte nach Uran-Konzentration, für ausgewählte Lagerstätten

Uranvorräte [t U] nach Urankonzentration [% U]



Tab. 2: Wichtige Lagerstätten, bei denen Uran-Konzentration oder Uran-Inhalt bekannt sind

Lagerstätte	Land	Bergwerks-Typ	Status	Urankonzentration [%U]		Inhalt [t U]		
							Gesamt	
McArthur River	Kanada	UG	O	sehr hoch	17.96%	151883	279510	
Cigar Lake	Kanada	UG	P		13.70%	127627		
Midwest	Kanada	UG	P	hoch	3.80%	13200	52596	
McClellan Lake	Kanada	OP, UG	O		2.00%	19300		
Dawn Lake	Kanada				1.51%	8585		
Rabbit Lake	Kanada		O		1.10%	11511		
Koongarra	Australien			gut	0.68%	12330	305524	
Jabiluka	Australien	UG			0.43%	60208		
Baker Lake	Kanada				0.41%	15094		
Akouta	Niger	UG	O		0.38%	29000		
Cerro Solo	Argentinien				0.35%	2200		
Arlit	Niger	OP	O		0.30%	14000		
Roco Honda	USA				0.26%	4600		
Kintyre	Australien				0.26%	30000		
Lagoa Real	Brasilien		O		0.25%	79712		
Ranger	Australien	OP	O		0.24%	51300		
Sheep Mountain	USA		P		0.21%	3080		
Ben Lomond	Australien				0.21%	4000		
Mardain Gol	Mongolei				0.19%	1005		759136
Sierra Pintada	Argentinien				0.19%	2440		
Dornod	Mongolei				0.18%	20000		
Krasnokamensk	Rußland	UG	O		0.18%	170000		
Beverley	Australien	ISL	O	0.15%	17800			
Kayelekera	Malawi			0.16%	9920			
Gurvanbulag	Mongolei			0.15%	16040			
Nemer	Mongolei			0.15%	2528			
Yeelirrie	Australien			0.13%	44100			
Aldansky	Rußland	UG		0.13%	200000			
Nose Rock	USA			0.12%	5624			
Valhalla	Australien			0.12%	14000			
Angela	Australien			0.11%	9752			
Michelin	Kanada			0.11%	7000			
Imouraren	Niger			0.11%	80000			
Nisa	Portugal			0.11%	1923			
Skal	Australien			0.11%	2923			
Frank M	USA			0.10%	1350			
Maureen	Australien			0.10%	2544			
Macusani	Peru			0.10%	1790			
Oobagooma	Australien			0.10%	8438			
Mulga Rock	Australien			0.10%	13000			
Manyingee	Australien	ISL		0.10%	6665			
Goulds Dam	Australien	ISL		0.10%	1696			
Honeymoon	Australien	ISL		0.10%	2798			
Westmoreland	Australien			0.10%	17300			
Ingulsk'ii	Ukraine	UG	O	0.10%	27000			
Karkhu	Rußland			0.10%	7000			
Severinskoye	Ukraine			0.10%	50000			
Zarechnoye	Kasachstan	ISL	P	0.10%	14500			

Fortsetzung von Seite 10

Lagerstätte	Land	Bergw.- Typ	Status	Urankonzentration [%U]	Inhalt [t U]	
						Gesamt
Workman Creek	USA			0.093%	3773	753134
Langer Heinrich	Namibia	OP	P	0.093%	9459	
Hansen	USA			0.086%	10654	
Smith Ranch	USA	ISL	O	0.085%	12500	
Domiasiat	Indien		P	0.085%	7819	
Dieter Lake	Kanada			0.085%	42300	
Reno Creek	USA	ISL		0.063%	2271	
Antelope	USA			0.060%	5770	
Saelices el Chico	Spanien			0.060%	8500	
Olympic Dam	Australien	UG, BP	O	0.053%	302000	
Vitimsky	Rußland	ISL	P	0.051%	15500	
Nowthanna	Australien			0.046%	2317	
Lambapur Pedagattu	Indien		P	0.044%	5900	
Lake Maitland	Australien			0.043%	5000	
Aurora	USA			0.042%	6359	
Jaduguda	Indien	UG	O	0.040%	?	
Inkay	Kasachstan		P	0.040%	35194	
Rietkuil	Südafrika	BP		0.037%	143000	
Munkuduk	Kasachstan			0.035%	49000	
Napperby	Australien			0.034%	5088	
Rössing	Namibia	OP	O	0.029%	80730	
Highland	USA	ISL	O	?	2810	281261
Taylor Ranch	USA	ISL		?	3850	
Ruby Ranch	USA	ISL		?	1848	
Bear Creak	USA	ISL		?	1848	
Peach	USA			?	1771	
JAB	USA			?	1154	
Gas Hills	USA	ISL	P	?	7007	
Charlie	USA			?	1610	
Vasquez	USA	ISL	O	?	1425	
Dewey/Burdock	USA	ISL		?	2387	
Ram Claim	USA			?	2300	
Mt Taylor	USA			?	38500	
Hosta Butte	USA	ISL		?	5000	
Crownpoint	USA	ISL	P	?	15000	
Church Rock	USA	ISL	P	?	7350	
Big Red	USA	ISL		?	2348	
Crow Butte	USA	ISL	O	?	3465	
Schwartzwalder	USA			?	6150	
Itataia	Brasilien			?	77337	
Vatutinskii	Ukraine	UG	O	?	25500	
Muyunkum	Kasachstan			?	43700	
Gurvan Saihan	Mongolei			?	8701	
Dalmatovkoye	Rußland	ISL	O	?	10200	
Malinovskoye	Rußland	ISL		?	10000	
Gesamt						2431161

BP = Nebenproduct, ISL = in-situ leaching, OP = Tagebau, UG = unter Tage
O = in Betrieb, P = geplant

b. Marginale Uran-Lagerstätten

Es gibt verschiedene Typen von Uran-Lagerstätten, die unter den gegenwärtigen Bedingungen nicht wirtschaftlich abgebaut werden können, oder in denen das Uran nur als Nebenprodukt wirtschaftlich gewonnen werden kann. Unter veränderten wirtschaftlichen Bedingungen könnten jedoch auch solche Lagerstätten (wieder) Bedeutung erlangen.

- **Nebenmineral zu Gold**

In Südafrika wird Uran als Nebenprodukt im Goldbergbau gewonnen. Südafrikas Uran-Vorräte stammen hauptsächlich aus einer solchen Nebenprodukt-Gewinnung. In Anbetracht des ungünstigen Wechselkurses der Landeswährung und des bis vor kurzem noch niedrigen Uran-Preises gibt es zurzeit nur ein Goldbergwerk (Vaal River), dessen Anlage zur Uran-Abtrennung noch in Betrieb ist. Bei den anderen Goldbergwerken sind die Anlagen zur Uran-Abtrennung stillgelegt worden. Das Uran landet also in den Deponien mit den Aufbereitungsrückständen. Bei veränderten wirtschaftlichen Gegebenheiten könnten diese Rückstände zur Rückgewinnung von Uran genutzt werden (siehe S. 14).

- **Nebenmineral zu Kupfer**

Olympic Dam, Australien: In dieser sehr großen Kupfer-Lagerstätte fällt Uran als Nebenprodukt an. Trotz der niedrigen Uran-Konzentration von 0,053% beträgt der Uran-Vorrat insgesamt 302.000 Tonnen Uran, wodurch es sich um die größte Uran-Lagerstätte der Welt handelt. Im Jahr 2004 trug Uran 21% zum Umsatz des Bergwerks bei (siehe Tab. 3). Kürzlich gemachte Vorschläge zur Kapazitätserweiterung würden die jährliche Produktion mehr als versiebenfachen.

Tab. 3: Produktion des Bergwerks Olympic Dam im Jahr 2004, nach [WMC HP]

Produkt	Produktion 2004	Konzentration im Erz	Durchschnittspreis 2004	Produktwert [Mio. US\$]	Wertanteil
Kupfer	224731 t Cu	2.5% Cu	1,30 US\$/lb	644	74%
Uran	4404 t U ₃ O ₈ = 3735 t U	0.042% U	18,65 US\$/lb	181	21%
Silber	861628 Feinunzen = 26,8 t Ag	3.0 ppm Ag	6,65 US\$/oz	6	1%
Gold	88633 Feinunzen = 2,757 t Au	0.31 ppm Au	409 US\$/oz	36	4%
Gesamt				867	100%

Palabora, Südafrika: Dieses Kupferbergwerk hat von 1994 bis 2002 Uran als Nebenprodukt erzeugt. Wegen Unwirtschaftlichkeit ist die Anlage zur Uran-Abtrennung seither außer Betrieb.

Rakha, Surda und Mosaboni, Indien: Die Kupfererze im Singhbhum Thrust Belt im indischen Bundesstaat Jharkhand enthalten kleine Mengen an Uran-Mineralien, die als Nebenprodukt gewonnen werden. Die Aufbereitungsrückstände der Kupfergewinnung enthalten etwa 0,0085% Uran und werden in drei Uran-Abtrennungsanlagen in Rakha, Surda und Mosaboni verarbeitet. Das hier gewonnene Uran-Vorkonzentrat wird zur weiteren Verarbeitung zur Aufbereitungsanlage in das Uran-Bergwerk Jaduguda gebracht [IAEA 1997a].

- **Nebenmineral zu Phosphat**

Phosphaterze haben einen durchschnittlichen Uran-Gehalt von 50 bis 200 parts per million (ppm). Die Weltvorräte an Phosphaterzen enthalten potentielle Uran-Vorräte von 5 bis 15 Mio. Tonnen. Wichtige Lagerstätten sind in Marokko, den USA, Mexiko und Jordanien. Diese Vorräte sind nicht in Tab. 1 enthalten.

Das weithin eingesetzte Schwefelsäure-Verfahren konzentriert das Uran im Produktstrom (Dünger, Detergentien usw.). Es gibt verschiedene Technologien zur Rückgewinnung des Urans aus dem Produktstrom, womit zum einen dieser unerwünschte Bestandteil nicht in die Produkte gelangt, und zum anderen eine alternative Quelle zur Uran-Gewinnung zur Verfügung steht. Weltweit gibt es etwa 400 Phosphorsäure-Anlagen, die mit dem Nassverfahren arbeiten. Im Prinzip könnten dort 11.000 Tonnen Uran jährlich gewonnen werden. [IAEA 2001a] geht von einer tatsächlich gewinnbaren Menge von 3.700 Tonnen Uran jährlich aus.

In den USA sind seit 1976 insgesamt acht Anlagen für die Uran-Abtrennung aus Phosphorsäure gebaut und in Betrieb genommen worden (sechs in Florida und zwei in Louisiana). Weitere Anlagen wurden in Kanada, Spanien, Belgien, Israel und Taiwan gebaut. Die Betriebskosten für die Uran-Abtrennung lagen im Bereich von 22 bis 54 US\$/lb U_3O_8 . Da diese Betriebskosten bei weitem über den Uran-Preisen der letzten Jahre lagen, wurden die meisten Uran-Abtrennungsanlagen außer Betrieb gesetzt. Mit dem starken Anstieg der Uran-Preise in letzter Zeit verändert sich die Lage nun erneut.

Eine Wiederinbetriebnahme der Uran-Abtrennung bei der Phosphatgewinnung würde dafür sorgen, dass sich das Uran nicht weiter in den phosphatgedüngten Böden ansammeln könnte, ein Problem, das zunehmend Sorge bereitet.

- **Schwarzschiefer**

Verschiedene Typen von marginalen Uran-Lagerstätten sind nicht in der Statistik der Uran-Vorräte in Tab. 1 enthalten. Die wichtigsten davon finden sich in Schwarzschiefern.

Schwarzschiefer-Lagerstätten können 50 bis 400 ppm (0,005 – 0,04%) Uran enthalten. Wegen ihrer großen Ausdehnung gibt es hier sehr große Vorräte, wie Tab. 4 an einigen Beispielen zeigt.

“Schwarzschiefer-Lagerstätten beinhalten zwar große Vorräte, werden aber hohe Produktionskosten verursachen, und ihre Ausbeutung würde riesige Bergwerke, Aufbereitungsanlagen und Deponien für die Aufbereitungsrückstände erfordern. Dies würde sicherlich Widerstände von Umweltschützern hervorrufen. Außerdem wird im Raum Ronneburg derzeit für mehrere Milliarden Dollar die Wismut-Sanierung durchgeführt. Daher stellen die Schwarzschiefer-Lagerstätten eine Langzeit-Reserve dar, die erst bei Uran-Preisen oberhalb von 130 US\$/kg Uran wirtschaftlich interessant wird, allerdings nur unter der Annahme, dass der Widerstand von Umweltschützern überwunden werden könnte, was für keine der drei genannten Lagerstätten als sicher gelten kann” [IAEA 2001a].

Tab. 4: Beispiele von Schwarzschiefer-Lagerstätten [IAEA 2001a]

Ort	Fläche [km ²]	Uran-Vorrat [t U]	Uran-Konz. [ppm U]
Ronneburg, Thüringen	164	169.230	850 – 1700
Ranstad, Schweden	500	254.000	170 – 250
Chattanooga Shale, USA	80.000	4 – 5 Mio.	57

- **Uran in Meerwasser**

In einem 1999 herausgegebenen Bericht empfahl „The President's Committee Of Advisors On Science and Technology“ (PCAST) dem US-Präsidenten, an der internationalen Forschung zur Uran-Gewinnung aus Meerwasser teilzunehmen.

Die Uran-Konzentration im Meerwasser ist sehr niedrig, sie beträgt in etwa drei Milligramm pro Tonne. Das PCAST ging seinerzeit davon aus, dass Uran aus Meerwasser zu einem Preis von etwa 312 US\$ je Kilogramm Uran zu gewinnen sei. Dies entspräche dem nahezu zehnfachen des heutigen Marktpreises von 37,50 US\$ je Kilogramm Uran.

Forschungsarbeiten zur Uran-Gewinnung aus Meerwasser werden auch am Bhabha Atomic Research Centre (BARC) im indischen Mumbai durchgeführt [Times of India, Feb 25, 2003].

2. Sekundäre Vorräte (d.h. andere Vorräte als in geologischen Lagerstätten)

a. Uran-Gewinnung aus alten tailings

Unter Uran-Gewinnung aus alten tailings versteht man die Gewinnung von Uran aus Aufbereitungsrückständen, die bei der Gewinnung von Uran und/oder anderen Metallen aus Erzen anfallen.

Deponien mit Abfallgestein oder Uranerz-Aufbereitungsrückständen (tailings) haben noch einen Restgehalt an Uran. Wegen der abnehmenden Ausbeute des Extraktionsverfahrens mit sinkenden Uran-Konzentrationen steigt der Anteil des zurückbleibenden Urans mit fallenden Uran-Konzentrationen. Unter bestimmten Umständen (wie z.B. bei steigenden Uran-Preisen oder etwa bei enthaltenen anderen Nebenmineralien) kann die Verarbeitung solchen Materials zur Uran-Rückgewinnung wirtschaftlich werden.

In der Tat hatte die Firma Aflase Gold and Uranium Resources Ltd. angekündigt, das in den Aufbereitungsrückständen der Firma Harmony Gold in Südafrika enthaltene Uran gewinnen zu wollen. Die Vorräte betragen 59.619 Tonnen Uran in "hochgradigem" Abfall und tailings Material, mit dessen Verarbeitung in etwa zwei Jahren begonnen werden könnte. Weitere 55.772 Tonnen Uran in "niedriggradigen" tailings seien für eine zukünftige Verarbeitung ins Auge gefasst worden [Business Day Feb 3, 2005]. Das Projekt wurde jedoch zu den Akten gelegt, als Bohrungen in mehreren der fraglichen Deponien ergaben, dass "der Uran-Inhalt die Erwartungen nicht erfüllte" [Business Report May 26, 2005].

b. Wiederaufarbeitungsuran (RepU)

Wiederaufarbeitungsuran (RepU) ist Uran, das durch Wiederaufarbeitung aus abgebrannten Brennelementen abgetrennt wurde.

Wiedergewinnung von Uran aus abgebrannten Brennelementen findet derzeit hauptsächlich in den Wiederaufarbeitungsanlagen La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien) statt. Bisher wurde jedoch nur ein Bruchteil des abgetrennten Urans tatsächlich wieder zu neuem Brennstoff verarbeitet. Und anscheinend wird sich das in absehbarer Zukunft auch nicht so schnell ändern.

In Frankreich hat das Elektrizitätsversorgungsunternehmen „Electricité de France“ (EdF) stattdessen Vorkehrungen für die Langzeitlagerung des Aufarbeitungsurans (RepU) für 250 Jahre getroffen, wie aus einem kürzlich erschienenen Bericht des französischen Rechnungshofs hervorgeht [Cour des Comptes 2005]. Von den jährlich in Frankreich anfallenden 1.050 Tonnen abgebrannter Uranoxid-Brennelemente werden derzeit 850 Tonnen in La Hague wiederaufgearbeitet. (Es fallen außerdem noch 100 Tonnen abgebrannter MOX-Brennelemente an, die gar nicht wiederaufgearbeitet werden.) Bei der Wiederaufarbeitung der Uranoxid-Brennelemente werden etwa 816 Tonnen Uran und 8,5 Tonnen Plutonium zurückgewonnen. Von dem gewonnenen Uran werden etwa 650 Tonnen zur Langzeitlagerung in die stabilere Oxidform umgewandelt, in der Hoffnung auf eine zukünftige Verwendung. Das Uran, das in der früheren Wiederaufarbeitungsanlage von Marcoule abgetrennt wurde, ist überhaupt nicht zu neuem Nuklearbrennstoff weiterverarbeitet worden. Es lagert immer noch als flüssige Uranylinitrat-Lösung in Marcoule - darunter 3.800 Tonnen, die sich im Besitz von EdF befinden sowie 4.800 Tonnen im Besitz von CEA und Cogéma.

Die Verwendung von Wiederaufarbeitungsuran ist aus einer Reihe von Gründen problematisch: Da das RepU mit den künstlichen Uran-Isotopen U-232 und U-236 kontaminiert ist, müssen während der Weiterverarbeitung besondere Vorkehrungen getroffen werden. U-232 und seine Zerfallsprodukte verursachen erhöhte Strahlenbelastungen für das Anlagenpersonal, und das U-236 erfordert als Neutronenabsorber eine höhere Anreicherung des Urans, um dieselbe Reaktivität zu erreichen. So ist die Verwendung von RepU unter den derzeitigen Marktbedingungen nicht besonders attraktiv; die Konversion ist dreimal so teuer wie für Natururan, und die Anreicherung kann in Frankreichs einziger Anreicherungsanlage (der

Gasdiffusionsanlage von Eurodif) gar nicht durchgeführt werden, da das RepU die Anlage kontaminieren würde. Zur Herstellung von zwei Test-Chargen von Brennelementen für das Kernkraftwerk Cruas wurde das RepU in einer ausländischen Anlage (vermutlich in Russland) angereichert.

Für das IAEA Szenario gemachte Annahme:

- Die Verwendung von RepU nimmt bis 2016 langsam zu, wonach sie dann bis 2050 bei 2500 Tonnen Uran jährlich stehen bleibt [IAEA 2002].

c. Gestrecktes HEU

Gestrecktes, hochangereichertes Uran (HEU) ist Uran aus Atomwaffen, das zum Gebrauch in Nuklearbrennstoff zu niedrigangereichertem Uran (LEU) gestreckt wurde.

Im Jahr 1993 haben die USA und Russland das „U.S.-Russia HEU Agreement“ abgeschlossen, in dessen Rahmen Russland über einen Zeitraum von 20 Jahren die Menge gestrecktes Uran liefern sollte, die aus 500 Tonnen HEU gewonnen werden kann. Diese Menge ersetzt letztlich 153.000 Tonnen Natururan und 92 Mio. SWU-Anreicherungsarbeit.

Die Lieferungen nach diesem Abkommen (LEU produziert aus 30 Tonnen HEU jährlich, das etwa 9.000 Tonnen Unat ersetzt) sind noch im Gange und sollen bis 2013 weitergehen.

Inzwischen haben die USA damit begonnen, eigenes überschüssiges HEU zu strecken. Eine Gesamtmenge von 153 Tonnen HEU war dafür vorgesehen, wovon etwa 39 Tonnen bereits verarbeitet sind; insgesamt soll die Verarbeitung bis 2016 dauern [IAEA 2004].

Tab. 5 zeigt die aktuellsten – jedoch unvermeidlich unzuverlässigen – Schätzungen für die HEU-Vorräte in der Welt.

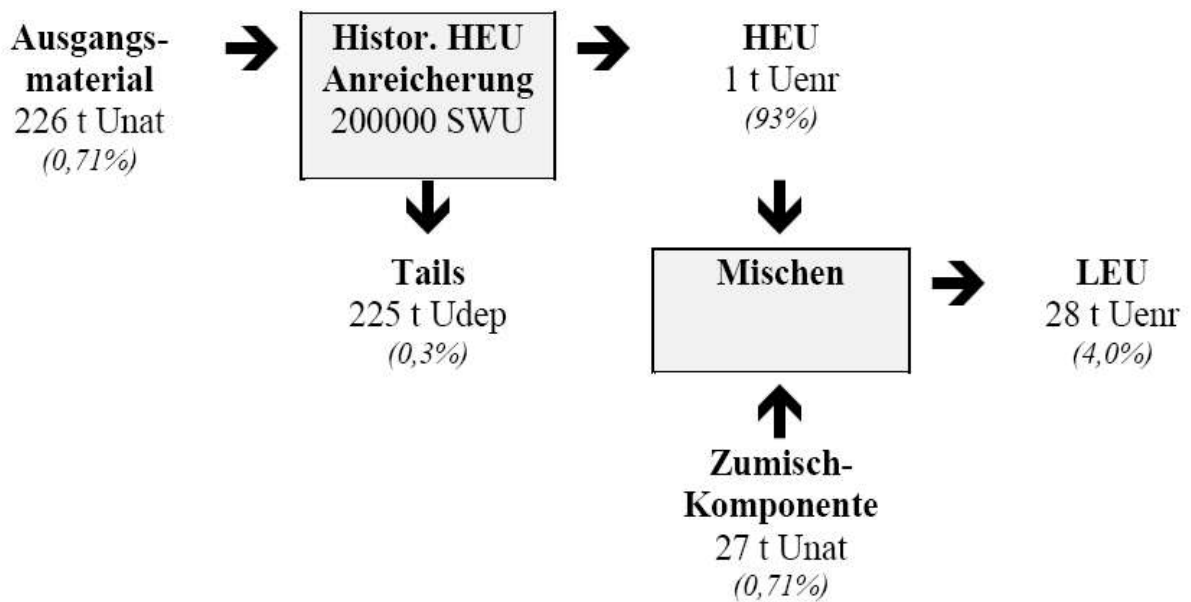
Tab. 5: Waffentaugliches HEU, Ende 2003 (in t) [CISAC 2005]

	Militärisches HEU (93% äquiv.)		Ziviles HEU
	(Gesamt)	(Überschuß)	
Belgien	--		?
China	20 ± 5		?
Frankreich	30 ± 7		6.4
Deutschland			0.8
Indien	?		
Israel	--		
Japan	--		?
Nordkorea	?		
Pakistan	1-1.25		
Südafrika			0.4-0.6
Großbritannien	~21		1.6
USA	700 ± 50	123	?
UdSSR/Russland	1.070 ± 300	300	?
Gesamt	1.840 ± 360	423	~50

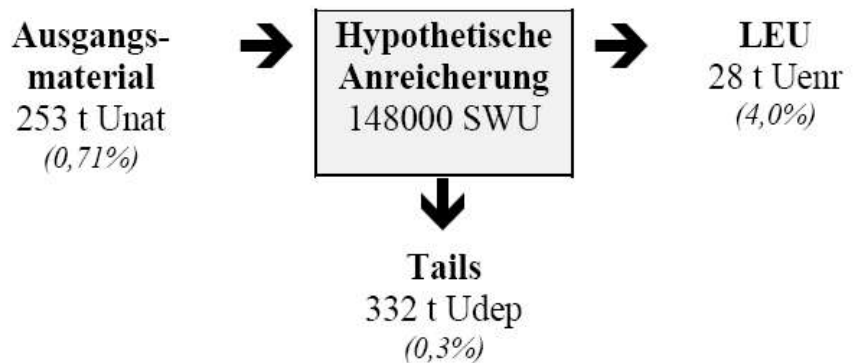
LEU-Gewinnung pro t HEU:

Strecken von 1 t HEU (93%) mit 27 t Unat ergibt 28 t LEU (4%), das 253 t Unat und 148.000 SWU ersetzen kann (siehe Abb. 5).

Abb. 5: Geschätzte Massenbilanz für das Strecken von HEU mit Unat (pro t HEU)



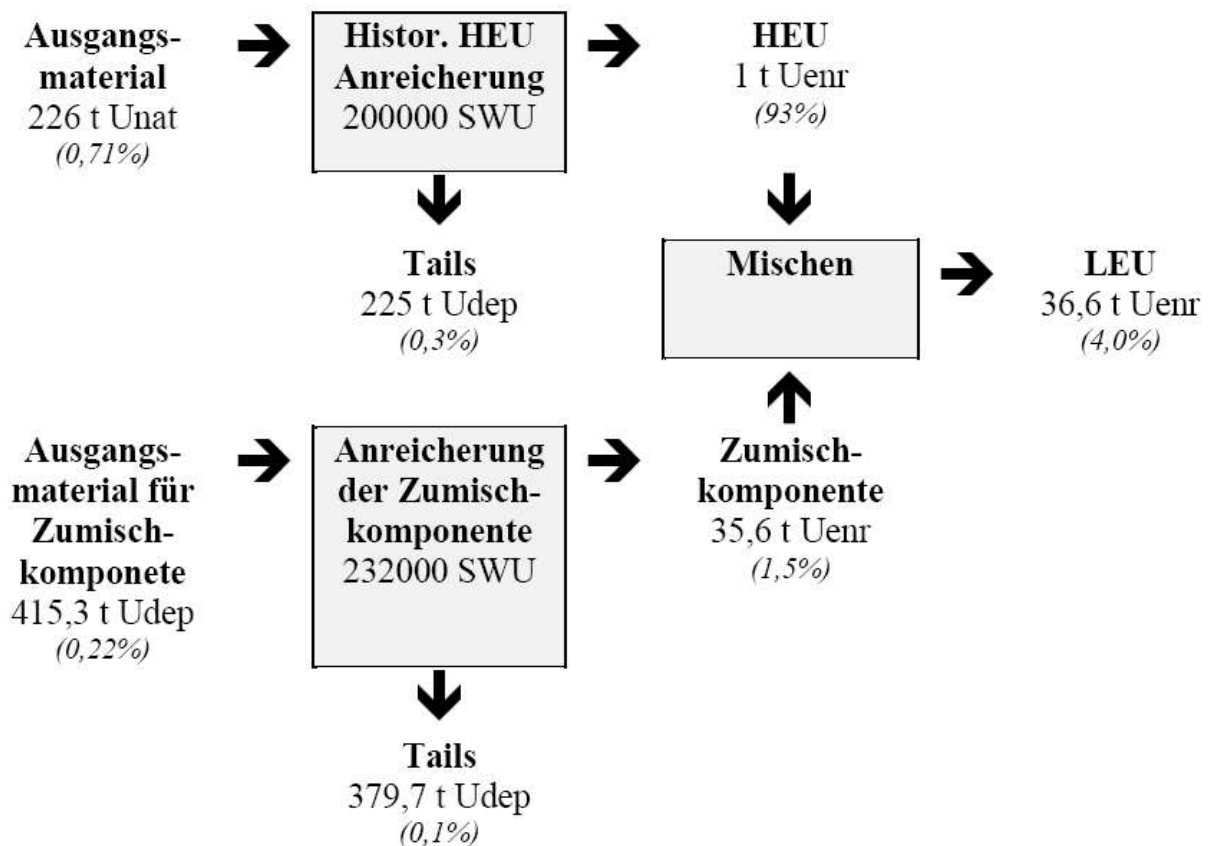
Referenzfall für die LEU-Erzeugung:

*kursiv:* U-235 Konzentrationen

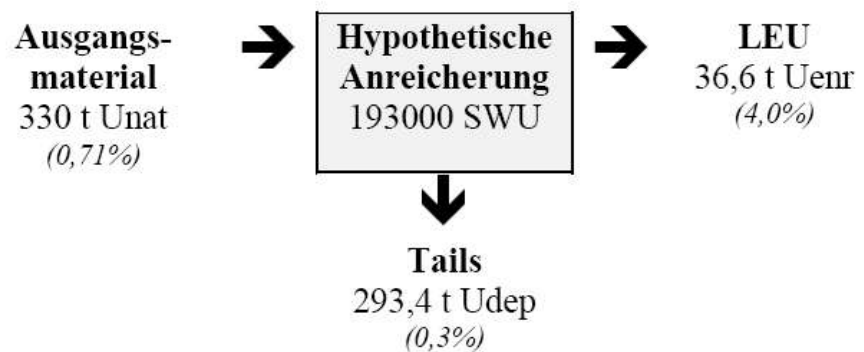
Leider hat das HEU nicht nur eine hohe Konzentration an U-235, sondern auch an dem unerwünschten Nuklid U-234. Wenn HEU mit Natururan verdünnt wird, kann die Konzentration von U-234 im Mischprodukt LEU evtl. die Industriespezifikationen überschreiten. Es ist daher ratsam, das HEU mit einem Material zu mischen, das eine verhältnismäßig geringe Konzentration an U-234 hat.

In Russland wird dieses Problem dadurch gelöst, dass eine Zumischkomponente mit einem U-235-Gehalt von 1,5% benutzt wird, die durch Wiederanreicherung von tails erzeugt wird. Dazu wird abgereichertes Uran mit überschüssigen Zentrifugen-Kapazitäten bis auf 1,5% angereichert. Diese Verfahrensweise erlaubt es Russland, seine Verpflichtungen aus dem U.S.-Russia HEU Agreement zu erfüllen, ohne seine knappen Vorräte an Natururan angreifen zu müssen.

Abb.6: Geschätzte Massenbilanz für das Strecken von HEU mit wiederangereicherter Zumischkomponente (pro t HEU)



Referenzfall für die LEU-Erzeugung:



Kursiv: U-235-Konzentrationen

In diesem Fall ergibt das Strecken von einer Tonne HEU (93%) mit 35,6 Tonnen Uran Zumischkomponente (1,5%) dann 36,6 Tonnen Uran (4%), wodurch 330 Tonnen Unat und 193.000 SWU ersetzt werden können. Die Zumischkomponente kann beispielsweise unter Aufwendung von 161.000 SWU aus 273 Tonnen Udep (0,3%) erzeugt werden oder unter Aufwendung von 232.000 SWU aus 415,3 Tonnen Udep (0,22%). Der letztere Fall (siehe Abb. 6) ist vermutlich der von Russland verfolgte, wie in [Diehl 2004] gezeigt wird. Es ist bemerkenswert, dass in diesem Fall für die Anreicherung der Zumischkomponente mehr SWU aufgewendet werden, als mit dem Strecken des HEU zurückgewonnen werden können.

Gemäß [NEA 2004] ersetzt eine Tonne HEU (93%) etwa 300 Tonnen Unat. Dies liegt gerade zwischen den 253 Tonnen aus Abb. 5 und den 330 Tonnen aus Abb. 6.

Für das IAEA Szenario gemachte Annahme:

- Hoch angereichertes Uran aus nicht mehr benötigten militärischen Beständen (HEU): Es wird angenommen, dass die derzeitigen Verträge zwischen den Regierungen der USA und Russland so erweitert werden, dass niedrig angereichertes Uran, das aus russischem HEU gewonnen wird, noch bis 2022 zur Verfügung stehen wird. Die Vermarktung von HEU aus US-Beständen wird bis 2023 dauern. Insgesamt wird angenommen, dass der Beitrag von HEU im Basisfall 249.500 Tonnen Uran betragen wird [IAEA 2002].

d. Uran aus Lagerbeständen von LEU, Unat

Über die Lagerbestände in der Welt an niedrig angereichertem Uran (low enriched uranium) und Natururan (Unat) gibt es nur wenige Informationen (siehe Tab. 6). Das ist einer der Gründe dafür, warum eine so große Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Uran-Markts herrscht.

Tab. 6: Uran-Lagerbestände, Stand 1.1.2003 [t Unat äquivalent] [NEA 2004]

Land	als Unat Konzentrat	als angereichertes Uran
Argentinien	> 110	0
Brasilien	20	0
Tschechien	> 2000	NA
Korea, Rep.	1100	2100
Litauen	0	140
Mexiko	300	0
Portugal	286	0
Spanien	NA	> 380
Türkei	2	0
USA	37845	20820
Gesamt	> 41663	> 23440

(nur die Länder angeführt, für die von Null verschiedene Zahlen verfügbar sind)

NA = nicht verfügbar oder nicht bekannt gegeben

Für das IAEA-Szenario gemachte Annahmen:

- Kommerzielle Bestände: Die Lagerbestände der westlichen Elektrizitätsversorger, Uran-Produzenten und Regierungsstellen werden auf insgesamt 168.500 Tonnen Uran-Äquivalent geschätzt, einschließlich strategischer und frei verfügbarer bzw. Überschussbestände. Es wird angenommen, dass der Abbau von Lagerbeständen der Elektrizitätsversorger 2006 und bei der US-Regierung 2014 endet. Weiterhin geht man davon aus, dass die Uran-Produzenten Lagerbestände in Höhe von zwei Dritteln des Vorjahresbedarfs unterhalten. Die Entnahme aus den Lagern der Produzenten wird dementsprechend schwanken [IAEA 2002].
- Russische Bestände: Die Entnahme aus den Beständen an russischem Natururan und niedrig angereichertem Uran wird abhängig von den HEU-Lieferungen schwanken. Da der Beitrag aus HEU zunimmt, wird die Lagerentnahme ständig abnehmen, bis sie 2014 zum Stillstand kommt, nachdem sie einen kumulierten Beitrag von 47.000 Tonnen Uran geleistet hat [IAEA 2002].

e. Uran aus Wiederanreicherung von abgereichertem Uran

Seit 1996 wird abgereichertes Uran (depleted uranium oder tails) der westeuropäischen Anreicherungsfirmen Urenco und Eurodif zur Wiederanreicherung nach Russland geschickt. Dort werden die tails statt Natururan in überschüssige Anreicherungskaskaden der russischen Atomenergiebehörde Rosatom (ehemals Minatom) eingespeist. Das Endprodukt der Wiederanreicherung ist überwiegend naturäquivalentes Uran, dazu etwas reaktortaugliches niedrig-angereichertes Uran (LEU). Diese Produkte werden an Urenco und Eurodif

zurückgeschickt, während die anfallenden sekundären tails in Russland bleiben, wo sie weiter wiederangereichert werden, um noch mehr naturäquivalentes bzw. schwach angereichertes Uran zu erhalten. Letzteres wird dann als Zumisch-Komponente für das Strecken von überschüssigem hoch-angereichertem Uran (HEU) in reaktortaugliches niedrig-angereichertes Uran (LEU) verwendet. Die dabei wiederum anfallenden tails, die immer noch mindestens zwei Drittel der ursprünglich importierten Menge ausmachen, verbleiben mit bislang unbekanntem Schicksal in Russland. Am 2. Mai 2005 gaben Cogéma/Areva bekannt, dass sie ein Technologie-Transfer-Abkommen mit Russlands Tenex abgeschlossen haben, bei dem es um die Defluoridierungstechnologie geht, die zum Umwandeln von abgereichertem Uran-Hexafluorid (UF_6) in U_3O_8 dient, einer für die Langzeitlagerung besser geeigneten Form. Im August 2005 erklärte Rosatom zudem, dass die tails in Schnellen Brütern verwendet werden können.

Auf der Grundlage von [NF, May 12, 2003] und [Bukharin 2004] können die folgenden Fakten über dieses Wiederanreicherungs-Geschäft zusammengetragen werden (siehe Diehl 2004 für weitere Details):

1) Die Wiederanreicherungs-Geschäfte zwischen Urenco/Eurodif und Rosatom:

- Urenco und Eurodif schicken jeweils 7.000 Tonnen Uran in tails pro Jahr zur Anreicherung nach Russland. Urencos tails haben einen U-235-Gehalt von 0,3%, Eurodifs einen von 0,35%.
- Rosatom wendet insgesamt 2,58 Mio. SWU für diese Wiederanreicherung im Auftrag von Urenco and Eurodif auf. Rosatom berechnet nicht den Marktpreis für die aufgewandten SWU, sondern vermutlich nur die Betriebskosten in Höhe von US\$20 pro SWU.
- Urenco und Eurodif erhalten jeweils 1.100 Tonnen wiederangereichertes naturäquivalentes Uran (U_{nat}) als UF_6 zurück. Etwa die Hälfte der von Urenco und Eurodif zurückerhaltenen Gesamtmenge an wiederangereichertem naturäquivalentem Uran von 2.200 Tonnen wird von Stromversorgern in der EU verbraucht, der Rest wird exportiert. Eurodif erhält außerdem 130 Tonnen Uran als UF_6 auf 3,5% angereichertes Uran.

2) Die sekundären tails aus dem Geschäft mit Urenco/Eurodif werden von Rosatom auf eigene Rechnung weiter wiederangereichert:

- Rosatom reichert sie bis auf einen U-235-Gehalt von 0,1% ab.
- Rosatom erhält auf diese Weise weitere 3.300 Tonnen Uran (wahrscheinlich aber nur 2.231 Tonnen Uran) wiederangereichertes naturäquivalentes Uran pro Jahr, die es selber verbrauchen oder auf eigene Rechnung verkaufen kann. Rosatom verwendet zumindest einen Teil dieses Materials für die Herstellung der Zumischkomponente (1,5% U-235) für das Strecken von HEU (siehe S. 15).

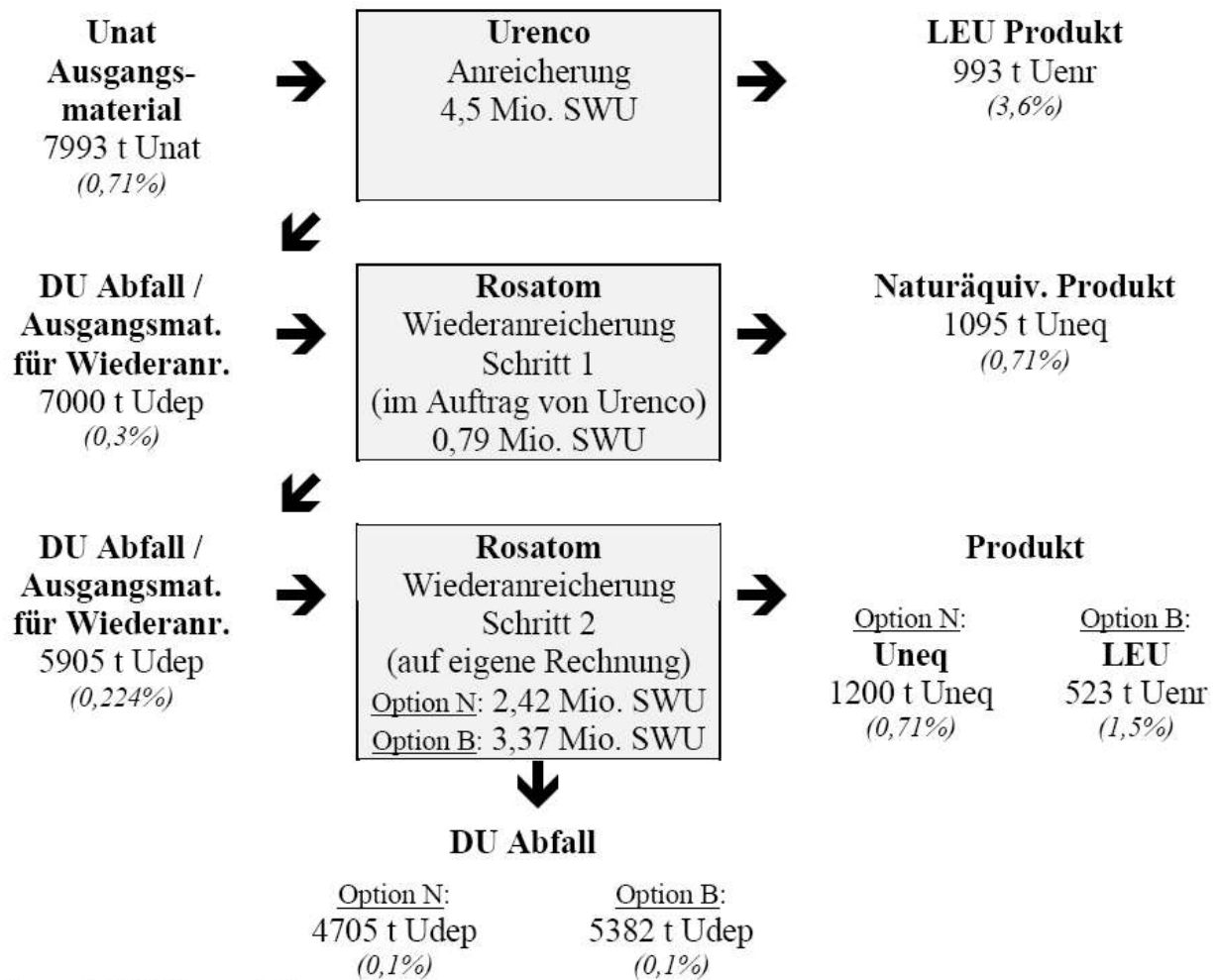
Die resultierenden Massenbilanzen sind in Abb. 7 für Urencos tails und in Abb. 8 für Eurodifs tails gezeigt. Rosatom reichert weiterhin auch noch tails aus seinen eigenen DU-Beständen wieder an.

Urenco geht davon aus, dass das Wiederanreicherungs-Abkommen mit Russland nach 2010 endet [HSE 2004].

Für das IAEA Szenario gemachte Annahme:

- Lagerbestände an abgereichertem Uran (tails): Die Wiederanreicherung von tails wird begrenzt durch die Verfügbarkeit von billigen SWUs und durch die Schutzbestimmungen zum Sicherstellen einer friedlichen Verwendung beim Transfer großer Mengen abgereicherten Urans zu russischen Anreicherungsanlagen und beim Verbleib der sekundären tails in Russland. Es wird daher angenommen, dass die Wiederanreicherung von tails im Jahre 2011 endet – nach einem kumulativen Beitrag von 43.000 Tonnen Uran [IAEA 2002].

Abb. 7: Jährliche Massenbilanz für die Wiederanreicherung von Urencos tails [Diehl 2004]



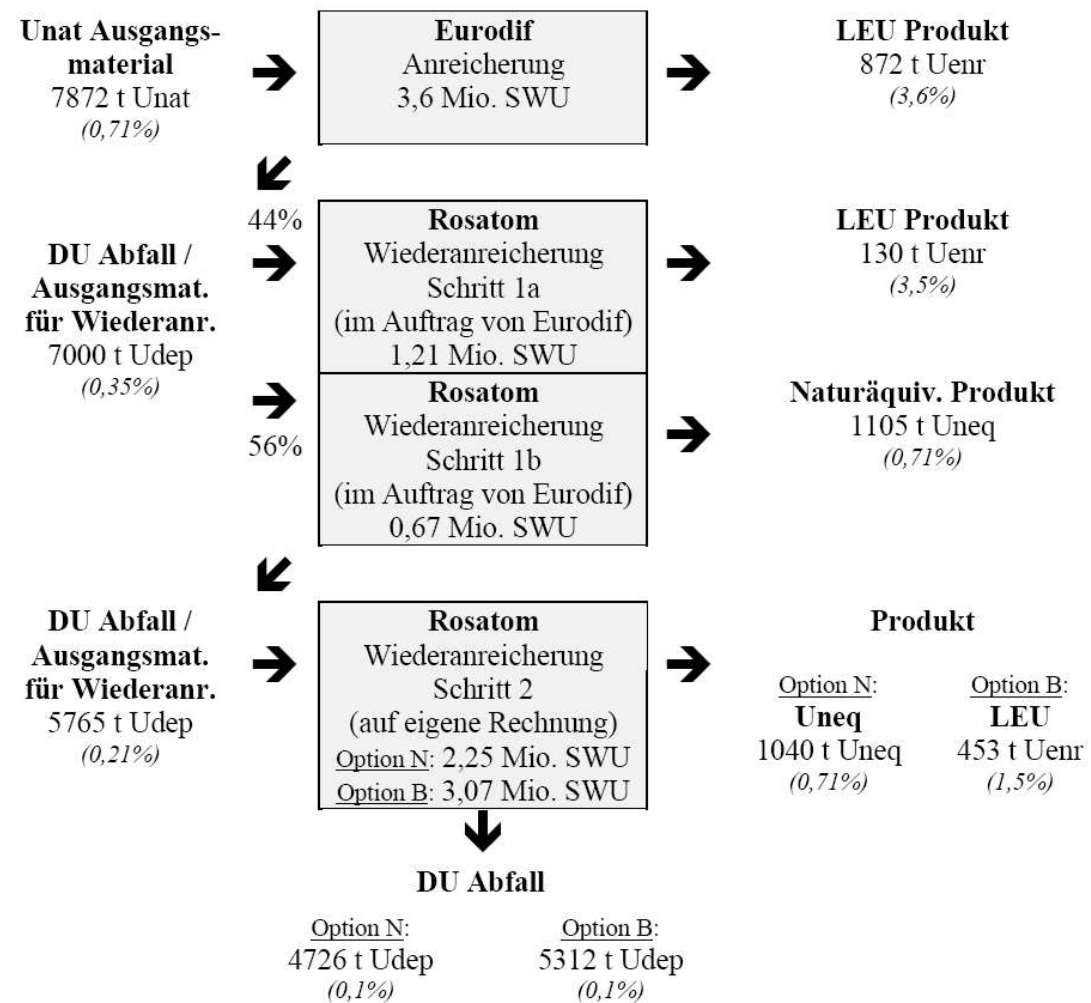
Kursiv: U-235 Konzentrationen

Produkt, das Rosatom auf eigene Rechnung erzeugt:

Option N: „naturäquivalentes“ Uran (0,71%), oder

Option B: Zumischkomponente (1,5%) zum Strecken von HEU

Abb. 8: Jährliche Massenbilanz für die Wiederanreicherung von Eurodifs tails [Diehl 2004]



Kursiv: U-235 Konzentrationen

Produkt, das Rosatom auf eigene Rechnung erzeugt:

Option N: „Naturäquivalentes“ Uran (0,71%), oder

Option B: Zumischkomponente (1,5%) zum Strecken von HEU

3. Ersatz von Uran

a. Plutonium (MOX-Brennstoff)

Bei Brennstoff für Leichtwasser-Reaktoren kann ein Teil des spaltbaren Uran-Isotops U-235 durch das Plutoniumisotop Pu-239 ersetzt werden. Zu diesem Zweck wird Plutonium mit Natururan oder leicht angereichertem Uran gemischt, um einen Mischoxid (MOX)-Brennstoff zu erzeugen. Plutonium steht aus überschüssigem Atomwaffenmaterial und aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen zur Verfügung. Tab. 7 zeigt einen Versuch, die weltweiten Lagerbestände an diesem Material zusammenzutragen:

Tab. 7: Waffenfähiges Plutonium, Stand Ende 2003 [t Pu] [CISAC 2005]

Land	Pu in Waffenqualität		Abgetrenntes ziviles Pu (im Lande)
	(Gesamt)	(Überschuß)	
Belgien	--		3,5
China	4,8 ± 2		0
Frankreich	5 ± 1,5		78
Deutschland	--		11
Indien	0,3-0,47		2-3
Israel	0,5-0,65		
Japan	--		5,4
Nord Korea	0,015-0,038		
Pakistan	0,02-0,06		--
Südafrika			
Großbritannien	7,6	4,4	96
USA	85	38	14,5
UdSSR/Russland	145 ± 25	50	38
Gesamt	248 ± 30	92	~252

Eine Tonne Plutonium in Waffenqualität ersetzt etwa 120 Tonnen Unat und 80.000 SWU [NEA 2004], [ESA AR 2003].

Im September 2000 haben die USA und Russland ein Abkommen zur Verwendung überschüssigen Plutoniums abgeschlossen, gemäß dem sie in den nächsten 25 Jahren jeweils 34 Tonnen überschüssiges Plutonium von Waffenqualität in MOX-Brennstoff umarbeiten werden. Zu diesem Zweck planen die USA den Bau einer MOX-Brennelementefabrik am Standort Savannah River in South Carolina, während die russische Anlage in Seversk gebaut werden soll. Einige erste Test-Brennelemente mit US-Plutonium wurden im französischen Cadarache und Marcoule hergestellt und im April 2005 zum Test im Kernkraftwerk Catawba in South Carolina ausgeliefert.

Die Gesamtmenge von 68 Tonnen Plutonium würde etwa 7.000 bis 8.000 Tonnen Unat ersetzen [NEA 2004].

Das Plutonium, das im Brennstoff kommerzieller Reaktoren durch die Neutronen-Aktivierung von U-238 entsteht, kann durch die Verarbeitung des abgebrannten Brennstoffs in einer Wiederaufarbeitungsanlage zurückgewonnen werden. Bisher findet eine solche Wiederaufarbeitung hauptsächlich in Europa statt, in La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien). Es wird nur ein Teil des tatsächlich anfallenden abgebrannten Brennstoffs verarbeitet. Zusätzlich zu den verursachten Umweltproblemen unterliegt die Wiederaufarbeitung verschiedenen technischen Beschränkungen: Nur diejenigen abgebrannten Brennelemente sind für die Wiederaufarbeitung geeignet, die ursprünglich überwiegend aus frischem Uran hergestellt worden waren, da ansonsten unerwünschte Isotope und Elemente das abgetrennte Plutonium kontaminieren würden. Im Jahre 2003 haben die Stromversorger in der EU (und diese sind bisher diejenigen, die am meisten MOX-Brennstoff verwendet haben) MOX-Brennstoff mit einem Plutonium-Inhalt von 12,12 Tonnen Plutonium eingesetzt, wodurch 1.450 Tonnen Unat und 0,97 Mio. SWU ersetzt worden sind [ESA AR 2003].

Für das IAEA-Szenario gemachte Annahme:

- Es wird angenommen, dass der Gebrauch von MOX-Brennstoff bis 2012 konstant zunimmt und sich dann bis 2050 bei 3.600 Tonnen Uran Natururanäquivalent stabil hält [IAEA 2002].

b. Thorium

Indien und China erwägen eine thoriumbasierte Brennstoff-Versorgung aufzubauen. Thorium-Brennstoff besteht z.B. aus Thorium (Th-232) und hochangereichertem Uran, eingebettet in eine Graphit-Matrix. Überschüssige Neutronen aus der Uran-Abspaltung wandeln das nicht spaltbare Th-232 in Th-233 um, das über die Zwischenstufe Pa-233 in das spaltbare Uran-Isotop U-233 zerfällt. Das Thorium kann das Uran also nicht komplett ersetzen, sondern den Uran-Bedarf nur vermindern.

thoriumbasierte Prototyp-Reaktoren (AVR in Jülich, THTR 300 in Hamm-Uentrop) sind nach einer ganzen Reihe technischer Probleme stillgelegt worden. Der von Südafrika propagierte Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) ist zwar ein Abkömmling des THTR, benutzt anscheinend jedoch kein Thorium. Die Thorium-Technologie wird hier nicht weiter betrachtet.

4. Kombinierte Daten der Uran-Vorräte

Tab. 8 fasst die Uran-Vorräte aus den unterschiedlichen Quellen zusammen.

Wiederaufarbeitungsuran und wiederangereichertes Uran sind in dieser Tabelle nicht erfasst, da für sie ein „Vorrat“ nicht ohne weiteres angegeben werden kann. Für sie können nur Produktionszahlen aufgrund von vorhandenen Verarbeitungskapazitäten angegeben werden.

Tab. 8: Zusammengefasste primäre und sekundäre Uran-Vorräte (ohne RepU und tails-Anreicherung)

Typ	Vorrat	Einheit	Faktor	t Unat äquiv.	Zwi.-Summe	Gesamt
RAR 80 \$/kgU ^{a)}	2.458.152	t Unat	1	2.458.152		
RAR 80 -130\$/kgU ^{a)c)}	711.086	t Unat	1	711.086		
EAR I 80 \$/kgU ^{a)}	1.078.762	t Unat	1	1.078.762		
EAR I 80 – 130 \$/kgU ^{a)c)}	340.688	t Unat	1	340.688		
-- Primär, Zwischensumme					4.588.688	4.588.688
HEU mil., Überschuß ^{b)}	423	t Uenr	300	126.900		
HEU zivil ^{b)}	50	t Uenr	300	15.000		
- HEU, Zwischensumme					141.900	
LEU Lagerbestand ^{a)} >	?	t Uenr	?	23.440		
Unat Lagerbestand ^{a)} >	41.663	t Unat	1	41.663		
- U Lagerbestand, Zwi.summe >					65.103	
Pu mil., Überschuß ^{b)}	92	t Pu	120	11.040		
Pu zivil ^{b)}	252	t Pu	120	30.240		
- Pu, Zwischensumme					41.280	
-- Sekundär, Zwischensumme						248283
Gesamtsumme						4.836.971

^{a)} Stand 1.1.2003 [NEA 2004]

^{b)} Stand 31.12.2003 [CISAC 2005]

^{c)} einschließlich Material, für das keine Kostenkategorie angegeben war

Wie man sieht, haben die in Tab. 8 enthaltenen sekundären Vorräte aus Lagerbeständen nur einen Anteil von etwa fünf Prozent an den Gesamtvräten.

5. Einflussfaktoren auf die Uran-Vorräte

Es existieren eine ganze Reihe von Faktoren, die sich auf die zukünftige Verfügbarkeit von Uran auf die eine oder andere Weise auswirken können. Das macht Vorhersagen sehr schwer.

- **Ausbeute beim Bergbau von Abbautechnologie abhängig**

Beim Lösungsbergbau (in-situ leaching) kann nur etwa 75% des im Erz enthaltenen Urans extrahiert werden, während es beim konventionellen Bergbau 95% und mehr sind. Eine zu erwartende Steigerung des Lösungsbergbau-Anteils senkt also die Ausbeute aus einer Lagerstätte und damit die insgesamt gewinnbare Uran-Menge.

- **Uran-Angebot steigt mit dem Preis**

Bei steigendem Uran-Preis beginnt sich der Abbau in marginalen Lagerstätten wirtschaftlich zu lohnen und die Gewinnung von Uran als Nebenprodukt, wie z.B. im Goldbergbau oder in der Phosphatgewinnung (derzeit weitgehend stillgelegt) kann wieder attraktiv werden. Auch die Rückgewinnung von Uran aus sekundären Quellen, wie z.B. aus Aufbereitungsrückständen aus dem Goldbergbau, ist wieder denkbar. Weiterhin könnte die Verwendung von Wiederaufarbeitungsuran zunehmen, die bislang unattraktiv ist, weil die Kosten wegen der Anwesenheit des unerwünschten Nuklids U-232 zu hoch sind und weil eine höhere Anreicherung (wegen des Gehalts an dem Neutronenabsorber U-236) nötig ist.

- **Die Gewinnung von Uran als Nebenprodukt ist abhängig von der des Hauptprodukts**

Die südafrikanische Goldbergbau-Industrie beispielsweise, die Uran als Nebenprodukt gewinnt, steckt derzeit in einer schweren Krise. Die Bergleute müssen immer tiefer vordringen, um an die verbliebenen Vorkommen zu gelangen – bis zu drei Kilometer tief, wo Temperaturen und Gebirgsdruck stark zunehmen, während ausländische Konkurrenten im Tagebau arbeiten können. Im Zusammenspiel mit dem hohen Wechselkurs der Landeswährung führt dies zu einer sinkenden Produktion bei steigenden Produktionskosten, mit der Folge, dass Bergwerke schließen müssen. Deshalb kann die Uran-Produktion nicht mehr ihren früheren Stand erreichen, selbst wenn der steigende Uran-Preis es erlaubt die Anlagen für die Uran-Abtrennung bei den Goldbergwerken wieder in Betrieb zu nehmen.

- **Neue Uran-Vorräte können durch Exploration gefunden werden**

Nach einer langen Zeit des Rückgangs nehmen die Explorations-Anstrengungen auf Uran nun wieder zu, insbesondere seit der Uran-Spotmarktpreis im September 2004 die Schwelle von US\$20/lb U_3O_8 erreichte. Viele Explorationsfirmen wurden neu gegründet oder haben ihr Geschäftsinteresse auf Uran gelenkt. Daher könnten neue Funde die bekannten Vorräte früher oder später vergrößern. Weitere Funde von sehr reichen und/oder sehr großen Lagerstätten sind zwar nicht unmöglich, es ist jedoch eher wahrscheinlich, dass durch die derzeitigen Anstrengungen kleinere Lagerstätten mit niedrigem Uran-Gehalt aufgefunden werden. Die spezifischen Explorationskosten pro gefundenem lb U_3O_8 werden vermutlich höher ausfallen als in den vergangenen Jahrzehnten.

- **Politische Opposition gegen neue Uran-Bergwerke**

Eine ganze Reihe von Uran-Lagerstätten können derzeit wegen politischer Opposition nicht abgebaut werden. Das bekannteste Beispiel ist das der Lagerstätte Jabiluka im australischen Northern Territory. Die Lagerstätte ist umgeben vom als Welterbe anerkannten Kakadu Nationalpark, gehört aber rechtlich nicht dazu. Wegen der andauernden Ablehnung der dortigen Ureinwohner musste der Bergwerksbetrieb ERA die Errichtung des Bergwerks abbrechen und den bereits angelegten Zufahrtsstollen zu der Lagerstätte wieder zuschütten. Ein weiteres Beispiel ist das Lösungsbergbauprojekt (in-situ leaching) in Crownpoint, New Mexico, USA. Die Genehmigung für dieses auf Navajo-Land liegende Projekt wurde im Mai 2000 auf Betreiben von Betroffenen eingefroren. Inzwischen hat der Navajo Council ein Gesetz mit dem Verbot jeglichen Abbaus und der Verarbeitung von Uran auf Navajo-Land verabschiedet, das am 29.4.2005 in Kraft trat.

Die Genehmigung für Cogémas McClean-Lake-Bergwerk in Saskatchewan, Kanada, wurde im September 2002 auf Betreiben einer örtlichen Umweltorganisation durch Gerichtsentscheid

aufgehoben. Aber die Firma erstritt kurz darauf eine Duldung des laufenden Betriebs und gewann das Verfahren endgültig im März 2005.

Die geplanten neuen Uran-Bergwerke in den indischen Bundesstaaten Andhra Pradesh und Meghalaya stehen unter heftigem Beschuss örtlicher Umweltgruppen.

Die Opposition gegen neue Uran-Bergwerke ist jedoch nicht auf Umweltschutzorganisationen und Ureinwohner beschränkt: In Australien lehnen die Regierungen dreier Bundesstaaten (Queensland, Victoria und Western Australia) jeglichen Uran-Bergbau ab. Das hält Explorationsfirmen jedoch nicht davon ab, ihre Arbeit in diesen Staaten fortzusetzen. Sie hoffen offensichtlich darauf, dass diese Staaten ihre Politik ändern werden. Im Übrigen hatte die frühere Labor-Regierung in Australien eine „3-mines policy“ aufgestellt, der zufolge nicht mehr als drei Uran-Bergwerke gleichzeitig in ganz Australien in Betrieb sein sollten, aber die gegenwärtige Regierung hat diese Politik aufgegeben.

- **Auswirkung von Anreicherungskosten und tails assay**

Der Bedarf an Natururan, das in eine Anreicherungsanlage eingespeist wird, hängt von dem tails assay ab, dem gewählten Restgehalt an U-235 im abgereicherten Uran. Der tails assay wird gewählt in Abhängigkeit von dem Kostenverhältnis zwischen Anreicherung und Natururan. Wenn der Uran-Preis beträchtlich steigt, dann wird es attraktiv, den Natururan-Bedarf bei der Anreicherung auf Kosten zusätzlicher Anreicherungsarbeit zu senken (siehe Tab. 9). In diesem Fall wird der tails assay niedriger, wodurch jedoch die tails wiederum weniger interessant für eine eventuelle spätere Wiederanreicherung werden. Neue Anreicherungstechnologien könnten ebenfalls dieses Kostenverhältnis beeinflussen. Im Moment werden neue – angeblich effizientere – Zentrifugen von USEC in den USA entwickelt sowie ein laserbasiertes Anreicherungsverfahren von Silex in Australien.

Tab. 9: Massenbilanz der Anreicherung für 1 t LEU Produkt (3,6% U-235) in Abhängigkeit von tails assay

	0,30 %	0,25 %	0,20 %	0,15 %	0,10%
Unat Zufuhr [t U]	8,05	7,28	6,67	5,16	4,74
SWU	4.531	5.020	5.646	6.494	7.763
Udep tails [t U]	7,05	6,28	5,67	6,16	5,74

- **Politische Opposition gegen MOX-Brennstoff**

Verschiedene Aspekte der Verwendung von MOX-Brennstoff rufen seit langem immer wieder politische Opposition hervor, darunter insbesondere die Gefahren und Umweltbelastungen durch die Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen und die Notwendigkeit von Plutonium-Transporten über weite Entfernungen.

- **Verfügbarkeit von HEU unterliegt politischen Entscheidungen**

Die zum Strecken zu LEU verfügbaren Mengen an HEU unterliegen politischen Entscheidungen. Die derzeit gültigen HEU-Abkommen werden 2013 auslaufen. Es ist möglich, jedoch nicht sicher, dass Anschlussabkommen geschlossen werden, wie im IAEA-Szenario angenommen.

- **Verfügbarkeit von überschüssigen AnreicherungsKapazitäten für die Wiederanreicherung von tails**

Die Wiederanreicherung von abgereichertem Uran ist auf die Verfügbarkeit großer überschüssiger Zentrifugen-AnreicherungsKapazitäten zu minimalen Kosten angewiesen. Derzeit sind solche Kapazitäten nur in Russland verfügbar, aber es ist unwahrscheinlich, dass diese Kapazitäten auch in Zukunft zur Verfügung stehen werden. Urenco nimmt an, dass die Wiederanreicherungs-Verträge mit Russland nach 2010 auslaufen [HSE 2004].

- **Unsicherheit über Lagerbestände**

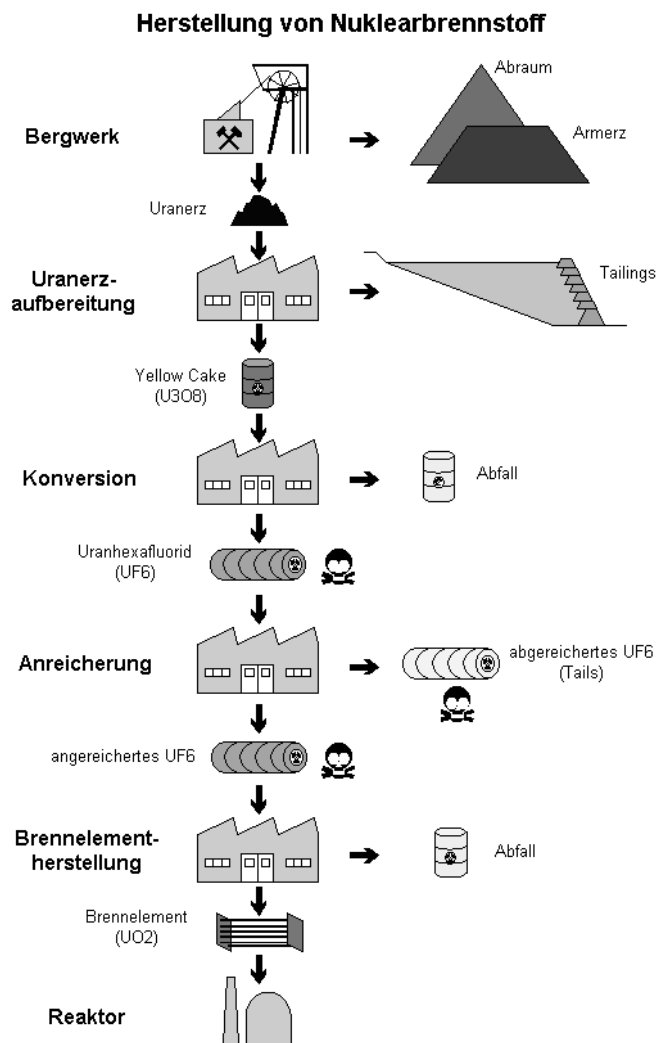
Das Wissen über die Uran-Mengen, die, in welcher Form auch immer (Natururan, LEU, HEU (zum Strecken)), abgereichertes Uran (für Wiederanreicherung, Wiederaufarbeitungsuran) in Lagern gehalten werden, ist äußerst begrenzt. Die diesbezügliche Tabelle in [NEA 2004] zeigt mehr „NA“ (nicht verfügbar) Einträge als tatsächliche Zahlen, und für Wiederaufarbeitungsuran liegt keine einzige Zahl vor.

B. Auswirkungen des Uran-Bergbaus auf die Umwelt

1. Übersicht über die Umweltauswirkungen

Die größten Umweltauswirkungen während der Produktion von Nuklearbrennstoff entstehen bei den ersten Schritten, dem Abbau und der Aufbereitung von Uranerz (siehe Schema in Abb. 9).

Abb. 9: Schema der Herstellung von Nuklearbrennstoff (für konventionellen Bergbau)



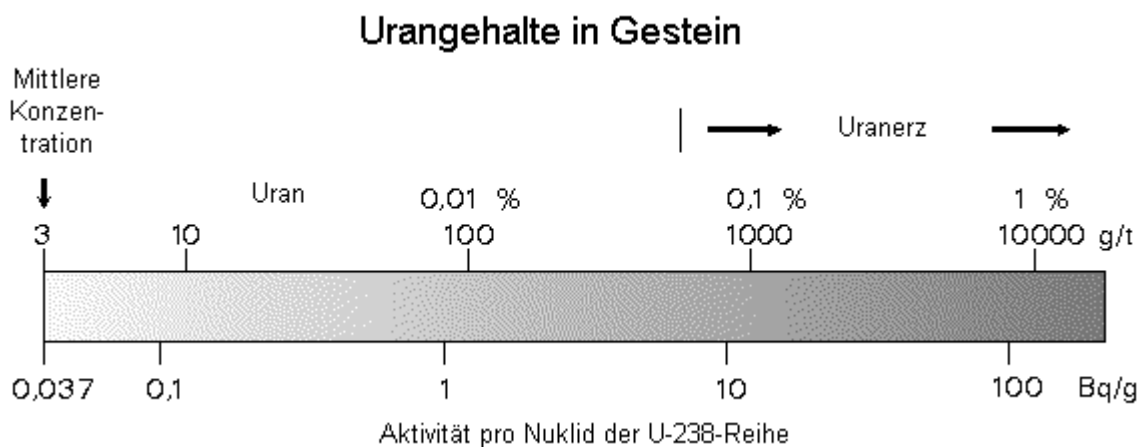
a. Uran-Bergwerke

Uran wird überwiegend im Tagebau oder in Untertage-Bergwerken abgebaut. Außer bei einigen wenigen Reicherzlagerstätten enthält das Erz einen Uran-Anteil von unter 0,5%. Deshalb müssen große Mengen Erz abgebaut werden, um an das Uran zu kommen. Während des Bergbaus werden große Mengen kontaminierten Wassers aus dem Bergwerk abgepumpt und in Flüsse und Seen abgelassen, wo die enthaltenen Radionuklide sich oft in Sedimenten anreichern. Die Belüftung der Bergwerke mindert zwar die Gesundheitsgefahren für die Bergarbeiter, bläst aber radioaktiven Staub und Radongas ins Freie und trägt damit zum Lungenkrebsrisiko der Anwohner bei.

b. Abfallgestein

Abfallgestein entsteht beim Tagebau, wenn Deckgestein entfernt wird und beim Untertagebau, wenn Strecken durch taubes Gestein getrieben werden. Halden von so genanntem Abfallgestein enthalten häufig gegenüber normalem Gestein erhöhte Konzentrationen von Radioisotopen. Andere Abfallhalden bestehen aus Erzen, deren Uran-Gehalt zu niedrig für eine Aufbereitung ist. Der Grenze zwischen Abfallgestein und Erz hängt von den technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten ab (siehe Abb. 10). Alle diese Halden stellen auch nach Schließung des Bergwerks eine Bedrohung für Anwohner und Umwelt dar, da Radongas und Sickerwasser mit radioaktiven und giftigen Inhaltsstoffen austreten kann. Abfallgestein wurde oft zu Schotter oder Zement verarbeitet und zum Bau von Straßen und Bahnlinien benutzt. Auf diese Weise wurde Schotter mit erhöhten Radioaktivitätswerten über größere Regionen verteilt.

Abb. 10: Skala der Uran-Konzentrationen in Gestein



c. Haldenlaugung

In bestimmten Fällen wird Uran aus niedriggradigen Erzen durch Haldenlaugung gewonnen. Diese Methode kommt infrage, wenn der Uran-Gehalt im Erz zu niedrig ist für die wirtschaftliche Verarbeitung in einem Uranerz-Aufbereitungsbetrieb. Die basische oder saure Lösungsflüssigkeit (häufig Schwefelsäure) wird oben auf die Halde aufgebracht und sickert nach unten durch, bis sie auf eine Auskleidung unter der Halde trifft, wo sie aufgefangen und in eine Aufbereitungsanlage gepumpt wird.

Während des Laugungsprozesses stellen die Halden wegen der Abgabe von Staub, Radongas und Lösungsflüssigkeit eine Gefahr dar. Nach der Beendigung der Laugung kann fortgesetzte natürliche Laugung zu einem Langzeitproblem führen, falls das Erz das Mineral Pyrit enthält (FeS_2), wie z.B. die Uran-Lagerstätten in Thüringen und in Ontario, Kanada. In diesem Fall kann der Zutritt von Wasser und Luft zu einer fortwährenden Produktion von Schwefelsäure durch Bakterien innerhalb der Halde führen, wodurch letztendlich Uran und andere Schadstoffe jahrhundertlang freigesetzt werden und das Grundwasser kontaminieren können.

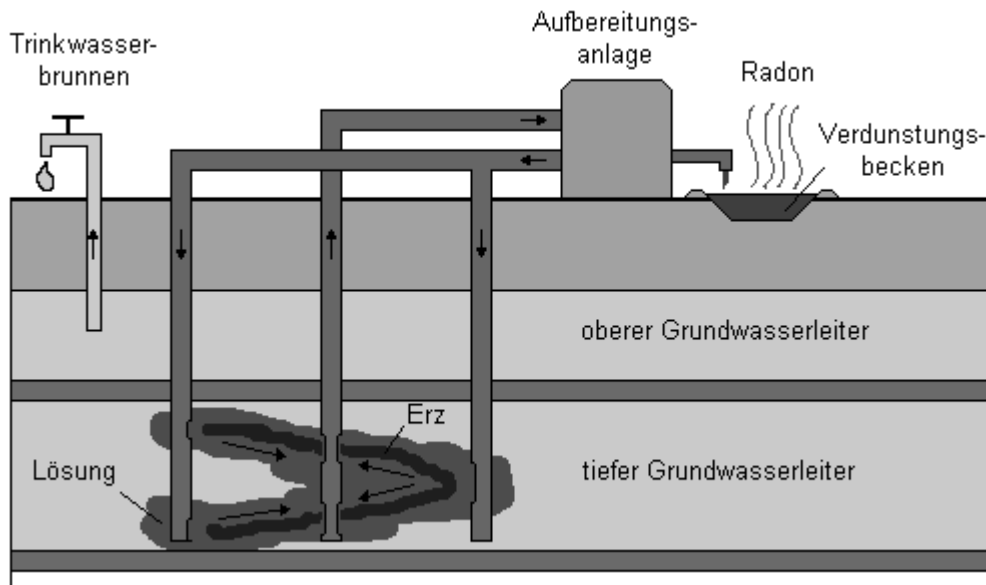
Während der zurückliegenden Tiefstände der Uran-Preise hat die Haldenlaugung zwar an Bedeutung verloren, könnte aber wieder mehr Bedeutung erlangen, wenn der Abbau von Erzen mit niedrigen Uran-Gehalten wieder interessant wird.

d. Lösungsbergbau (in-situ leaching)

Beim Lösungsbergbau wird eine basische oder saure Lösung (z.B. Ammoniumkarbonat oder Schwefelsäure) durch Bohrlöcher in eine unterirdische Uran-Lagerstätte gepresst und die uranhaltige Lösung anschließend wieder zur Oberfläche gepumpt (siehe Abb. 11). Bei dieser Technologie braucht also, anders als beim konventionellen Bergbau, das Erz nicht aus der

Lagerstätte herausgeholt zu werden. Die Technologie kann nur bei Lagerstätten eingesetzt werden, die in einem Grundwasserleiter in durchlässigem Gestein liegen, nicht zu tief unter der Oberfläche (ca. 200 m) und die von undurchlässigen Gesteinsschichten umgeben sind.

Abb. 11: Das Lösungsbergbau-Verfahren (in-situ leaching)



Die Vorteile dieser Technologie sind das verminderte Risiko für die Beschäftigten durch Unfälle und Strahlung, die niedrigeren Kosten und das Entfallen von großen Deponien mit Aufbereitungsrückständen. Wichtige Nachteile sind die Gefahr des Austretens von Lösungsflüssigkeit über die Lagerstätte hinaus mit nachfolgender Grundwasser-Kontamination und die Unmöglichkeit, nach Beendigung des Abbaus in dem Lösungsbereich die natürlichen Verhältnisse wiederherzustellen. Die kontaminierten Schlämme, die bei dem Verfahren anfallen, werden entweder in Becken an der Oberfläche abgelagert oder in Tiefbohrungen verpresst. In großem Maßstab, mit dem Einpressen von Millionen Tonnen von Schwefelsäure, wurde das Verfahren eingesetzt in Stráz pod Ralskem (Tschechoslowakei), an mehreren Standorten in Bulgarien und - mit etwas anderer Verfahrensordnung - in Königstein in Sachsen. In den USA wurde der Lösungsbergbau mit dem Rückgang der Uran-Preise in den letzten Jahrzehnten zur einzigen Quelle für heimisches Uran. Heute nimmt die Bedeutung des Lösungsbergbaus zur Ausbeutung von niedriggradigen Lagerstätten weltweit zu. So werden neue Vorhaben in Australien, Russland, Kasachstan und China vorbereitet.

e. **Aufbereitung des Erzes**

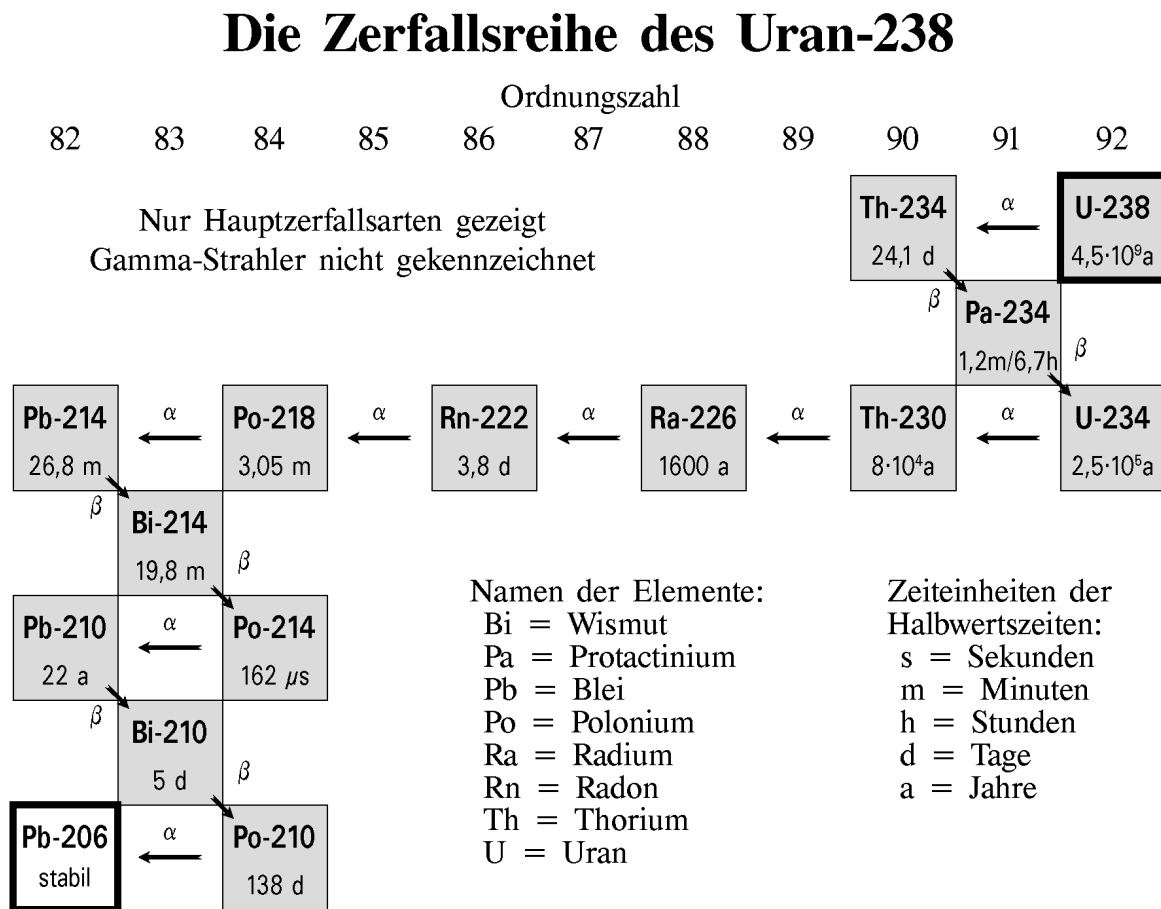
Das im Tagebau oder unter Tage gewonnene Erz wird in einer Aufbereitungsanlage gebrochen und gemahlen. Die Anlage ist meist in der Nähe des Bergwerks gelegen, um den Transportaufwand zu begrenzen. In einem hydrometallurgischen Prozess wird das Uran dann herausgelöst. In den meisten Fällen wird dazu Schwefelsäure eingesetzt, es kommt aber auch alkalische Laugung zum Einsatz. Da die Lösungsflüssigkeit nicht nur Uran aus dem Erz löst, sondern auch verschiedene andere Bestandteile wie Molybdän, Vanadium, Selen, Eisen, Blei und Arsen, muss das Uran aus der Flüssigkeit abgetrennt werden. Das Endprodukt der Aufbereitung, allgemein „Yellow Cake“ genannt (U_3O_8 mit Verunreinigungen) wird in Fässer verpackt und versandt. Gefahren gehen von der Aufbereitung vor allem durch Staubemissionen aus. Wenn eine Aufbereitungsanlage abgebaut wird, müssen große Mengen radioaktiv kontaminierten Schrotts sicher entsorgt werden.

f. Deponien für Uranerz-Aufbereitungsrückstände (tailings)

• Eigenschaften der Uranerz-Aufbereitungsrückstände

Die Rückstände der Uranerz-Aufbereitung haben zunächst eine schlammförmige Konsistenz. Üblicherweise werden sie zur Endlagerung in Absetzbecken gepumpt. Die entstehende Rückstandsmenge ist praktisch genauso groß wie die abgebaute Erzmenge, da das entzogene Uran nur einen sehr kleinen Anteil an der Gesamtmasse hat. Die pro gewonnener Tonne Uran anfallende Menge an Rückständen ist somit umgekehrt proportional zum Uran-Gehalt im Erz. Die größten Deponien für Aufbereitungsrückstände dieser Art in den USA und Kanada beinhalten bis zu 30 Mio. Tonnen Feststoffgehalt. Die Deponie Helmsdorf in Sachsen enthält 50 Mio. Tonnen und die Deponie Culmitzsch in Thüringen sogar 86 Mio. Tonnen.

Abb. 12: Die Zerfallsreihe von Uran-238



Außer dem Teil des Urans, das herausgelöst wurde, enthält der Rückstand alle Bestandteile des Erzes. Da die langlebigen Zerfallsprodukte wie Thorium-230 und Radium-226 nicht entfernt werden, enthält der Rückstand noch 85% der ursprünglich im Erz vorhandenen Radioaktivität. Zudem kann wegen technischer Begrenzungen nicht das ganze im Erz enthaltene Uran herausgelöst werden, so dass der Rückstand immer auch noch einen Rest Uran enthält. Weiterhin enthält der Rückstand Schwermetalle und andere Schadstoffe wie Arsen, daneben noch chemische Zusatzstoffe, die während der Aufbereitung zugefügt wurden.

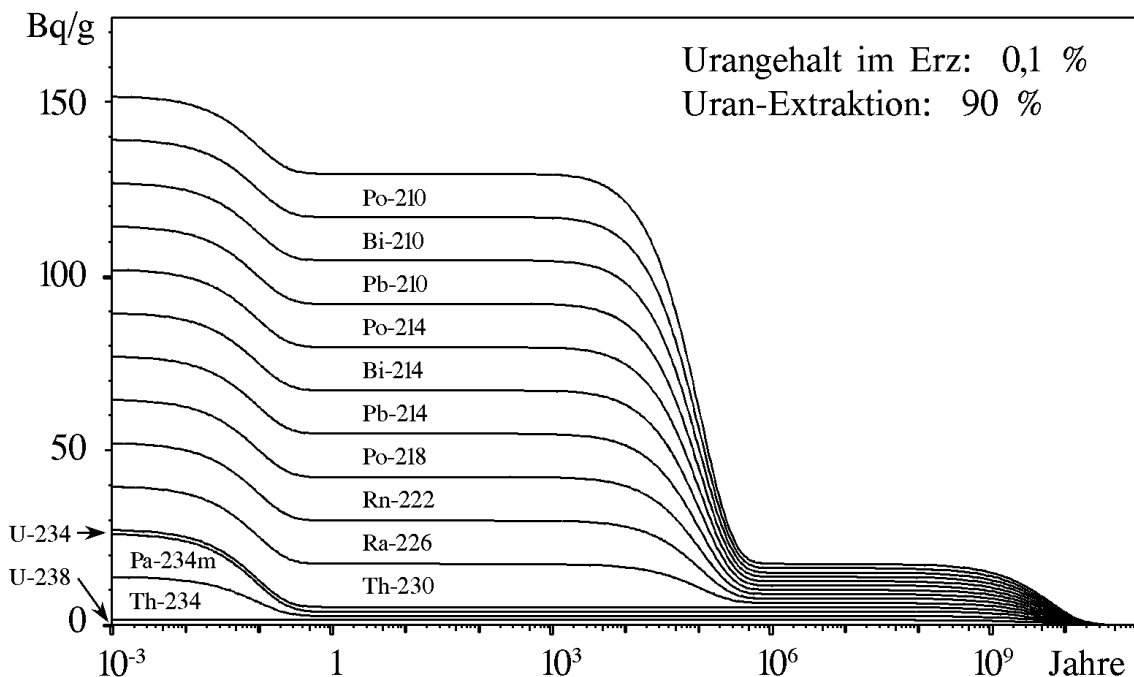
Aus den Deponien mit den Aufbereitungsrückständen tritt das Gas Radon-222 aus. Seine Halbwertszeit von 3,8 Tagen mag kurz erscheinen, da aber kontinuierlich neues Radon aus dem Zerfall von Radium-226 (Halbwertszeit 1.600 Jahre) entsteht, stellt das Radon eine Langzeitgefahr dar. Da der Vorläufer von Radium-226, das Thorium-230 auch noch vorhanden ist, wird zudem noch ständig neues Radium-226 produziert (siehe Zerfallsreihe in Abb. 12).

Während der ersten Monate geht die Radioaktivität der Aufbereitungsrückstände leicht zurück (aufgrund des Zerfalls von Th-234 und Pa-234m) und bleibt dann konstant. Erst nach mehreren hunderttausend Jahren geht die Radioaktivität der Rückstände – und damit ihre Radon-Abgabe merklich zurück; sie fällt dann bis auf den Wert, der durch den Restgehalt an Uran gegeben ist (siehe Abb. 13, man beachte die logarithmische Zeitachse).

Abb. 13: In den Uran-Aufbereitungsrückständen verbleibende Radioaktivität (Stapeldiagramm für die U-238-Reihe)

Radioaktivität in den Tailings

(U-238 Reihe)



• Gefahrenpotential von Uranerz-Aufbereitungsrückständen

Abb. illustriert die von den Aufbereitungsrückständen ausgehenden Gefahren.

Die in den Aufbereitungsrückständen enthaltenen Radionuklide emittieren etwa 20 bis 100 mal soviel Gammastrahlung wie man normalerweise an der Oberfläche über einer Lagerstätte findet. Die dadurch gegebene Gefährdung ist jedoch örtlich begrenzt, da die Gammastrahlung mit der Entfernung von der Deponie schnell abnimmt.

Wenn die Oberfläche der Deponie austrocknet, wehen feine Sande über angrenzende Gebiete.

Dann verfinstert sich über den Dörfern in der Nähe der Deponien mit den

Aufbereitungsrückständen der Wismut der Himmel. In der Folge fand man dann in diesen

Dörfern erhöhte Werte an Radium-226 und Arsen im Hausstaub. Daraufhin wurden die Deponien mit Abdeckungen versehen.

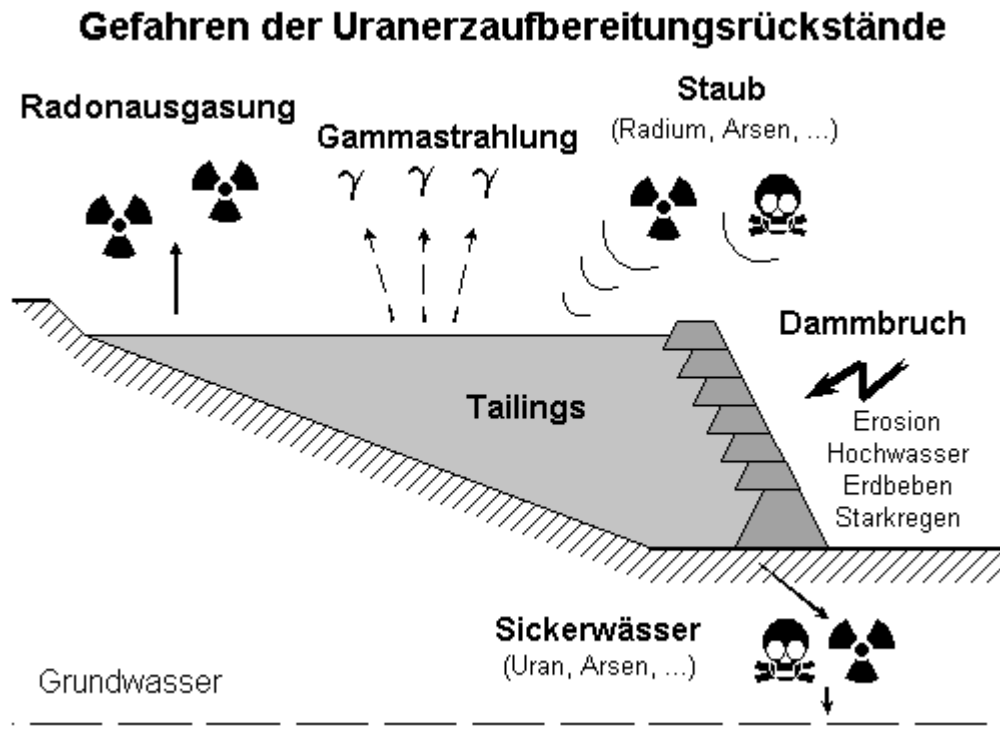
Das in den Rückständen enthaltene Radium-226 zerfällt fortwährend zu dem radioaktiven Gas Radon-222, dessen Zerfallsprodukte Lungenkrebs auslösen können, wenn sie eingeatmet werden.

Ein Teil dieses Radons kann aus dem Inneren der Deponie entweichen. Die austretende Radonmenge ist ziemlich unabhängig vom ursprünglichen Uran-Gehalt im Erz. Sie hängt hauptsächlich vom ursprünglichen Gesamt-Uran-Inhalt des abgebauten Erzes ab. Die Radon-Freisetzungen sind eine der Hauptgefahren, die auch nach der Beendigung des Bergbaus fortbestehen. Die US-Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) hat abgeschätzt,

dass das Risiko von Anwohnern einer 80 Hektar großen nicht abgedeckten Rückstands-Deponie, an Lungenkrebs zu erkranken, 2:100 beträgt.

Da das Radon schnell mit dem Wind verteilt wird, erhalten viele Personen kleine zusätzliche Strahlendosen. Obwohl das zusätzliche Risiko für den einzelnen klein ist, kann es nicht vernachlässigt werden wegen der großen Anzahl der Betroffenen. Unter Annahme einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung schätzte EPA, dass die 1983 in den USA vorhandenen Uran-Rückstands-Deponien für 500 Lungenkrebstote pro Jahrhundert verantwortlich zu machen wären, falls keine Gegenmaßnahmen ergriffen würden.

Abb. 14: Gefahren von Uranerz-Aufbereitungsrückständen



Sickerwässer aus den Deponien mit den Aufbereitungsrückständen stellen ein weiteres Gefahrenpotential dar. Sickerwässer können das Grund- und das Oberflächenwasser kontaminieren. Anwohner sind der Gefahr durch Uran und andere Schadstoffe wie Arsen ausgesetzt, die in ihr Trinkwasser und in die in der Region gefangenen Fische gelangen. Das Sickerwasser stellt insbesondere bei sauren Rückständen ein Problem dar, da die wichtigsten betroffenen Radionuklide unter sauren Bedingungen mobiler sind. In Rückständen, die Pyrit enthalten, entwickeln sich aufgrund selbsttätiger Schwefelsäurebildung saure Verhältnisse, die den Austrag von Schadstoffen in die Umwelt begünstigen.

Aufgrund der langen Halbwertszeiten der beteiligten radioaktiven Substanzen müssen die Rückstandsdeponien über sehr lange Zeiträume gesichert werden, was jedoch wegen der vielfältigen Erosionseinflüsse schwierig ist. Nach Niederschlägen können sich Erosionsrinnen bilden; Pflanzenwurzeln und grabende Tiere können in das Innere der Deponie eindringen und so das Material ausbreiten, die Radon-Ausgasung erhöhen und die ganze Deponie anfälliger für Erosion machen. Im Fall von Erdbeben, Starkregen oder Hochwasser können die Deponien sogar komplett zerstört werden. Im Folgenden werden einige Dammbüche von Deponien mit Uranerz-Aufbereitungsrückständen angeführt:

- 1977, Grants, New Mexico, USA: Austritt von 50.000 Tonnen Schlamm und mehreren Mio. Litern kontaminierten Wassers.
- 1979, Church Rock, New Mexico, USA: Austritt von über 1.000 Tonnen Schlamm und 400 Mio. Litern kontaminierten Wassers.

- 1984, Key Lake, Saskatchewan, Kanada: Austritt von über 100 Mio. Litern kontaminierter Flüssigkeit.

Gelegentlich wurden die trockenen Aufbereitungsrückstände wegen ihrer sandigen Beschaffenheit auch für den Hausbau oder andere Zwecke verwendet. In Häusern, bei denen dieses Material verwandt wurde, hat man hohe Werte von Gammastrahlung und Radon gefunden. Die US EPA schätzt das Lebenszeitrisiko von Bewohnern solcher Häuser an Lungenkrebs zu erkranken, auf vier Fälle pro 100 ein.

2. Sanierung von Uran-Bergwerken

In den frühen Jahren des Uran-Bergbaus, nach dem Zweiten Weltkrieg, haben die Bergbauunternehmen ihre Standorte vielfach ohne größere Aufräumarbeiten verlassen, wenn die Lagerstätte erschöpft war: In den USA wurden z.B. oft die Anlagen für Bergbau und Aufbereitung nicht abgerissen, nicht einmal die Grubenöffnungen wurden gesichert, ganz zu schweigen von einer langfristigen Sicherung der produzierten Abfälle; in Kanada wurden die Aufbereitungsrückstände vielfach einfach in den nächsten See gekippt.

• Bergwerke und Abfallgestein

In Kanada und den USA gibt es immer noch Hunderte verlassener Uran-Bergwerke, bei denen überhaupt keine Sanierung stattgefunden hat. In einigen Fällen sind die zuständigen Regierungsstellen immer noch damit beschäftigt, etwaige Besitzer herauszufinden, die für eine Sanierung haftbar gemacht werden könnten. Von Zeit zu Zeit nimmt auch irgendwo eine Behörde die Sanierung eines Standorts selbst in die Hand (oder kündigt das zumindest an). Ein Beispiel für eine erfolgreiche Sanierung ist das riesige „Jackpile Paguate“ Uran-Bergwerk in New Mexico. Beträchtlicher Aufwand ist auch für die Sanierung der umfangreichen Wismut-Altlasten in Ostdeutschland betrieben worden, die sich langsam ihrem Ende nähert. Die ehemalige Gessentalhalde in Thüringen, auf der mit Schwefelsäure Haldenlaugung betrieben worden war, ist in den Grund eines alten Tagebaulochs umgelagert und kompaktiert worden, um den Zutritt von Wasser und Sauerstoff auf Dauer möglichst gering zu halten. Die Grube wird derzeit noch mit anderem Abfallgestein weiter verfüllt.

• In-situ leaching

Wenn eine Anlage für Lösungsbergbau stillgelegt wird, müssen die Abfallschlämme sicher deponiert werden und der durch die Aktivitäten kontaminierte Grundwasserleiter saniert werden. Grundwassersanierung ist ein sehr mühsamer Prozess, der noch nicht vollständig beherrscht wird. Es ist bisher nicht möglich, in dem Grundwasserleiter die vor Beginn des Abbaus herrschenden Bedingungen wiederherzustellen, obwohl ausgeklügelte Abpump- und Reinigungsverfahren angewandt werden. In den USA wurden die Sanierungsanstrengungen in vielen Fällen nach jahrelangem Bemühen abgebrochen, nachdem die Schadstoffgehalte nicht ausreichend zurückgingen. Die standortspezifischen Sanierungsziele wurden dann jeweils gelockert. Während die US-Standorte meist in abgelegenen Gegenden liegen, in denen das Grundwasser schon von vornherein kaum genießbar ist, hat der für die Sowjetunion durchgeführte Lösungsbergbau riesige Altlasten in dicht besiedelten Regionen hinterlassen. Sanierungsvorhaben sind in Deutschland und in Tschechien im Gange, aber in Bulgarien wurden die betreffenden Standorte einfach sich selbst überlassen.

• Uranerz-Aufbereitungsrückstände

Uranerz-Aufbereitungsrückstände (tailings) werden meist in der einen oder anderen Form deponiert, um den Schadstoffaustrag in die Umwelt zu begrenzen. In den frühen Jahren ließ man die Rückstände jedoch in einigen Fällen einfach in die Umgebung laufen. Das erschreckendste Beispiel dafür ist der Fall von Mounana in Gabun, wo diese Praxis bis 1975 beibehalten wurde:

Eine Tochtergesellschaft der französischen Cogéma baute dort seit 1961 Uran ab. Während der ersten 15 Betriebsjahre wurden die Aufbereitungsrückstände einfach in den nächsten Bach eingeleitet. Insgesamt zwei Mio. Tonnen Rückstände sind so in die Umwelt verteilt worden. Sie haben das Wasser kontaminiert und abwärts im Tal Ablagerungen gebildet. Als 1999 Schluss mit dem Bergbau war, deckte man die verteilten Rückstände mit einer dünnen erosionsanfälligen Schicht aus unbelastetem Boden ab, statt die Rückstände abzutragen und kontrolliert zu deponieren.

Der nahe liegende Gedanke, die Rückstände dahin zu bringen, wo sie ursprünglich herkamen, führt nicht unbedingt zu einer akzeptablen Lösung bei der Rückstandsverwahrung. Obwohl dem Material das meiste Uran entzogen wurde, ist es doch nicht ungefährlicher geworden, eher im Gegenteil. Die meisten Schadstoffe (85% der ursprünglich vorhandenen Radioaktivität und alle chemischen Schadstoffe) sind noch vorhanden. Außerdem wurde das Material durch mechanische und chemische Prozesse in eine Form gebracht, in der die Schadstoffe viel mobiler sind und leichter in die Umwelt gelangen können. Daher können die Rückstände meist nicht einfach in alten Bergwerkshohlräumen gelagert werden, da sie dort nach dem Abschalten der Pumpen in direkten Kontakt mit dem Grundwasser kämen.

Die Situation ist ähnlich bei der Deponierung von Aufbereitungsrückständen in ehemaligen Tagebaugruben. Auch hier besteht in vielen Fällen ein direkter Kontakt zum Grundwasser, oder Sickerwässer könnten das Grundwasser kontaminieren. Ein Vorteil der Ablagerung in Tagebaugruben ist der relative gute Schutz gegen Erosion.

In Frankreich und Kanada wurde in den letzten Jahren allerdings an mehreren Standorten das Konzept verfolgt, die Aufbereitungsrückstände in alten Tagebaugruben *im* Grundwasser einzulagern. In diesem Fall wird zunächst eine hochdurchlässige Schicht um die Rückstände herum installiert, damit das Grundwasser frei um die Rückstände herum zirkulieren kann. Da die Rückstände selber eine kleinere Durchlässigkeit haben, wird angenommen (zumindest von den Verfechtern dieser Methode), dass praktisch kein Austausch von Schadstoffen zwischen Rückständen und Grundwasser stattfindet. Eine ähnliche Methode (genannt „previous surround disposal“) wird in Kanada für die Deponierung von Uranerz-Aufbereitungsrückständen in Seen oder alten Tagebaugruben verwendet. Bei neueren Vorhaben mit dieser Technik wird sogar die Notwendigkeit einer zusätzlichen durchlässigen Schicht um die Rückstände herum bestritten, da das umgebende Gestein schon eine genügend hohe Durchlässigkeit habe.

In den meisten Fällen müssen die Rückstände mangels anderer Möglichkeiten an der Erdoberfläche gelagert werden. Dort kann man die Schutzmaßnahmen durch geeignete Vorkehrungen leichter unter Kontrolle halten, es bedarf aber zusätzlicher Maßnahmen zum Erosionsschutz.

Detaillierte Regelungen für die Deponierung von Uranerz-Aufbereitungsrückständen wurden in den USA von der Umweltbehörde EPA und der Strahlenschutzbehörde NRC erlassen. Diese Bestimmungen legen nicht nur maximale Schadstoffkonzentrationen für Böden und zulässige Schadstoff-Freisetzungsraten (insbesondere für Radon) fest, sondern auch den Zeitraum, für den die getroffenen Schutzmaßnahmen wirksam bleiben sollen: 200 bis 1000 Jahre. Die Sanierungsmaßnahmen müssen also nicht nur dafür sorgen, dass die Grenzwerte nach der Beendigung der Arbeiten eingehalten werden, sondern auch auf lange Sicht, und das möglichst ohne dass Wartungsarbeiten erforderlich werden. Basierend auf diesen Vorschriften wurde über ein Dutzend von Altstandorten saniert, zum Teil vor Ort, durch Abflachen von Böschungen und Aufbringen von mehrlagigen Abdeckungen aus Erde und Gesteinsbrocken, zum Teil aber mussten die Rückstände auch an geeignetere Standorte umgelagert werden, um Gefahren durch Hochwasser oder die Kontamination von Grundwasser zu vermeiden.

In Kanada sind die für die Verwahrung der Rückstände ergriffenen Maßnahmen weniger weitgehend. Bei den großen Rückstandsdeponien im Gebiet von Elliot Lake in Ontario zum Beispiel, stellt eine Schicht Wasser über den Rückständen die einzige „Schutzbarriere“ dar. Die Aufbereitungs-Rückstände des derzeit arbeitenden Reicherz-Bergwerks McArthur River in

Saskatchewan werden in eine ehemalige Tagebaugrube des Bergwerks Key Lake gekippt, wo es immer wieder zu Hangrutschungen in die Deponie hinein kommt.

Bei den Uranerz-Aufbereitungsrückständen, die beim Uran-Bergbau für die Sowjetunion angefallen sind, ist die Lage ziemlich unterschiedlich: Während die Rückstände in Ostdeutschland und Estland derzeit an Ort und Stelle saniert werden, warten diejenigen in Tschechien, Ungarn, Kasachstan, Kirgistan u.a. noch auf entsprechende Maßnahmen. Die 100 Mio. Tonnen große Deponie von Aktau in Kasachstan hat nicht einmal eine provisorische Abdeckung bekommen, so dass immerfort große Mengen an Staub in die Nachbarschaft geblasen werden. Die kirgisischen Rückstände liegen an steilen Talhängen und sind durch Hangrutschungen stark gefährdet. Sickerwässer von den ungarischen Rückstands-Deponien bewegen sich auf ein Trinkwasserschutzgebiet der Stadt Pécs in Ungarn zu.

- **Sanierungskosten**

Die Kosten für die Sanierung von Uranerz-Aufbereitungsrückständen schwanken außerordentlich stark. Am oberen Ende liegen die Kosten, die für die von den jeweiligen Regierungen durchgeführten Sanierungsaktionen von Altlasten angefallen sind: 68 US\$ pro Tonne Rückstände in den USA und 49 US\$ in Ostdeutschland. Diese Zahlen sind jedoch nicht direkt vergleichbar, da die Zahl für Deutschland unter anderem auch die Sanierung der Bergwerke selbst beinhaltet, die Zahl für die USA jedoch nur die der Rückstände. Wenn man die aufgelaufenen Sanierungskosten auf das ursprünglich an diesen Standorten produzierte Uran umlegt, dann kommt man in beiden Fällen auf etwa 14 US\$/lb U_3O_8 . Dies ist mehr, als frisches Uran in den Jahren gekostet hat, bevor die derzeitige Preisrallye einsetzte. Die Höhe dieser Kosten ist zum Teil durch den Umstand bedingt, dass sich die Rückstände zunächst ablagern konnten, ohne dass Rücksicht auf die Umwelt genommen wurde. Wenn die Rückstände von Beginn an sorgfältig gehandhabt werden, können die Kosten bei gleichem Schutzniveau niedriger ausfallen. Am unteren Ende des Kostenbereichs (für Bergwerke, bei denen Uran das Hauptprodukt ist) liegen die in Kanada angefallenen 0,48 US\$ pro Tonne Rückstände bzw. 0,12 US\$/lb U_3O_8 . Dies ist Ausdruck der außerordentlich niedrigen Umweltstandards, die in Elliot Lake angewandt wurden.

Während die Kosten für die Sanierung der Aufbereitungsrückstände stark von den angewandten Umweltstandards abhängen, sind die Kosten pro Tonne Rückstände kaum vom ursprünglichen Uran-Gehalt im Erz abhängig, da die Notwendigkeit von Maßnahmen überwiegend durch den Erosionsschutz vorgegeben ist. Die Sanierungskosten pro Tonne erzeugten Urans sind daher in erster Näherung umgekehrt proportional zum Uran-Gehalt im Erz.

Um die Entstehung weiterer Altlasten zu vermeiden, die dann letztendlich wieder auf Kosten der Allgemeinheit zu sanieren sind, müssen Uran-Abbaufirmen heutzutage beim Beginn des Bergbaus Mittel in einen Sanierungsfonds einzahlen. Aber auch dann ist nicht gewährleistet, dass nicht doch wieder der Steuerzahler einspringen muss: Die Beträge, die für die Sanierung der Rückstände der Altas Corp. in Moab, Utah in den USA zurückgestellt wurden, decken gerade einmal drei Prozent der aktuellen Kostenschätzungen von 300 Mio. US\$ ab.

3. Typische Fallbeispiele früheren Uran-Bergbaus

Die Verfahren für den Uran-Bergbau sind zwar weltweit ähnlich, die einzelnen Betriebe können jedoch ziemlich große Unterschiede aufweisen: In den USA waren die meisten Uran-Bergwerke auf dem Colorado Plateau angesiedelt, in verhältnismäßig trockenen und abgelegenen Gegenden. In den frühen Jahren gab es Hunderte von kleinen Untertage-Bergwerken, gewöhnlich mit einem in einen Hang getriebenen waagrechten Stollen als Zugang. Im Jahr 1958 erreichte die Zahl der Uran-Bergwerke ein Maximum mit 850 Untertage- und 200 Tagebau-Betrieben, während die

Gesamtzahl der Uran-Bergleute gerade einmal 3.971 betrug. In späteren Jahren wurden auch große Bergwerke betrieben, wie Quivira und Homestake in New Mexico. Das Erz mit typischen Uran-Gehalten von 0,1-0,2% wurde in großen zentralisierten Aufbereitungsbetrieben verarbeitet.

Die Bergwerke in Elliot Lake (Ontario, Kanada), Ostdeutschland und der Tschechoslowakei waren überwiegend große Untertage-Bergwerke. Die europäischen Bergwerke lagen in dicht besiedelten Gegenden. Die Gruben wurden über senkrechte Schächte erreicht, und sie umfassten tausende Kilometer an unterirdischen Strecken. In Sachsen wurden Tiefen von knapp zwei Kilometer erreicht, was nur mit großem Kühlaufwand möglich war. Die Erze mit typischen Uran-Gehalten von 0,1% und weniger wurden in großen Aufbereitungsbetrieben in der Nähe verarbeitet. In Thüringen wurden auch sieben Mio. Tonnen Armerz in Haldenlaugung bearbeitet. Die Belegschaft in den ostdeutschen Bergwerken überschritt in den frühen Jahren 100.000 und lag Mitte der achtziger Jahre immer noch bei 27.000. Die Produktionskosten der Wismut betragen vor der Stilllegung zuletzt 380,50 DM pro Kilogramm Uran, das entspricht 90 US\$/lb U_3O_8 , während der Uran-Preis zu dieser Zeit etwa bei 10 US\$/lb U_3O_8 lag.

In der Tschechoslowakei gab es neben den konventionellen Bergwerken in Stráz pod Ralskem auch einen großen Betrieb mit Lösungsbergbau. Insgesamt wurden 3,7 Mio. Tonnen Schwefelsäure in die Lagerstätte gepresst, die sich über eine Fläche von 5,6 Quadratkilometer erstreckt und mit 9.340 Bohrungen erschlossen war. Nach der Stilllegung des Betriebs waren noch 28,7 Mio. Kubikmeter kontaminierter Flüssigkeit in der Abbauzone enthalten. Außerdem hatte sich die kontaminierte Flüssigkeit horizontal und vertikal über die eigentliche Abbauzone hinaus ausgebreitet und damit auf einer Fläche von 28 Quadratkilometer weitere 235 Mio. Kubikmeter Grundwasser kontaminiert.

4. Typische Fallbeispiele von aktiven Uran-Bergwerken

Von den frühen Uran-Bergwerken sind praktisch keine mehr in Betrieb; ihre Uran-Vorkommen sind erschöpft, oder sie haben die Jahrzehnte des daniederliegenden Uran-Marktes und das Ende des Kalten Krieges nicht überstanden. In der Krise am Uran-Markt konnten nur die wirtschaftlichsten Bergwerke bestehen. Das bekannteste Beispiel ist hier das 2000 in Betrieb gegangene Bergwerk McArthur River, das in einer abgelegenen Gegend im Norden von Saskatchewan in Kanada liegt. Mit seiner extrem hochgradigen und großen Lagerstätte ist es ziemlich einmalig; nur das gegenwärtig im Aufbau befindliche Bergwerk Cigar Lake wird mit ihm vergleichbar sein. Der Abbau der Lagerstätte stellt dennoch eine technische Herausforderung dar, da sie in einer Tiefe von ca. 500 Metern in instabilem Gestein liegt. Die Umgebung der Abbauzone muss deswegen vereist werden. Außerdem erfordert der hohe Uran-Gehalt im Erz einen ferngesteuerten Betrieb, um übermäßige Strahlendosen für die Arbeiter zu vermeiden. Das gewonnene Erz wird als Schlamm an die Oberfläche gepumpt und mit Lastwagen über 80 Kilometer zu der Aufbereitungsanlage Key Lake transportiert. Die Aufbereitungsrückstände werden dann in einer früheren Tagebaugrube von Key Lake eingelagert. Die Belegschaft von Bergwerk und Aufbereitungsbetrieb zusammen umfasst gerade einmal etwas mehr als 400 Personen.

Nahezu das Gegenteil dazu stellt das Rössing-Bergwerk in Namibia dar. Es liegt in einer Wüstenregion und beutet in einem riesigen Tagebau eine Lagerstätte mit sehr niedrigem Uran-Gehalt aus. Über eine Mrd. Tonnen Gestein sind seit 1976 aus der Grube abgefahren worden. Nur etwa ein Drittel des abgebauten Materials hat einen genügend hohen Uran-Gehalt für die Aufbereitung. Der Rest wird auf eine Armerzhalden gebracht oder als Abfallgestein abgelagert. Die Deponie mit den Aufbereitungsrückständen enthält mehr als 350 Mio. Tonnen und liegt im oberen Einzugsgebiet eines nahe gelegenen Tals, das nun durch Sickerwässer aus der Deponie bedroht ist. Bergwerk und Aufbereitungsbetrieb beschäftigen derzeit 820 Personen.

Ein weiteres sehr großes Uran-Bergwerk, das sehr niedriggradige Erze verarbeitet, ist das in einer Wüstenregion von Südastralien gelegene Olympic Dam. Aber hier handelt es sich um ein Untertagebergwerk, und Uran ist nur ein Nebenprodukt von Kupferbergbau. Es beutet dennoch den größten bekannten Uranerz-Körper aus.

Ein weiteres wichtiges Bergwerk, der Tagebau Ranger im australischen Northern Territory liegt in einer tropisch feuchten Klimazone, die besondere Herausforderungen für die Wasserwirtschaft und die sichere Deponierung der Aufbereitungsrückstände mit sich bringt.

C. Bestehende und geplante technische Kapazitäten

Während im Teil A die Verfügbarkeit von Uran-Vorräten beleuchtet wurde, geht es nun um die Verfügbarkeit von Produktionskapazitäten. Diese stellen eine weitere Einschränkung dar, die bei einer Reichweiten-Untersuchung der Vorräte berücksichtigt werden muss.

1. Uran-Bergbau

a. Übersicht

Die Schätzungen der IAEA für die Uran-Produktions-Kapazitäten bis 2020 gehen (wie in Tab. 10 zu sehen ist) von einem Rückgang aus. Das ist allerdings schon etwas überholt, wie weiter unten bei der Diskussion der derzeit geplanten Bergwerke deutlich wird. Die Gesamtkapazität wird wohl eher konstant bleiben oder sogar etwas ansteigen.

Tab. 10: Uran-Produktionskapazitäten der Welt [t U/a] bis 2020 ^{a)} [NEA 2004]

Land	2003	2004	2005	2010	2015	2020
Argentinien	0	120	500	500	500	NA
Australien	9.400	9.400	9.900	8.600	8.600	8.600
Brasilien	340	340	510	850	1.100	1.100
Kanada	14.890	12.885	10.275	7.200	7.200	7.200
China, Festld.	850	850	850	1.050	1.050	1.050
Tschechien	440	440	250	84	87	80
Indien	230	230	365	510	510	510
Iran	0	0	60	180	180	180
Kasachstan	3.315	3.500	4.000	4.000	4.000	4.000
Mongolei	0	0	150	150	150	150
Namibia	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Niger	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800	3.800
Pakistan	65	65	65	65	65	65
Rumänien	100	100	100	200	200	300
Russland	3.060	3.200	3.300	4.700	4.700	4.700
Südafrika	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
Ukraine	1.000	1.000	1.000	1.500	2.000	2.000
USA	2.200	2.200	2.600	1.900	1.200	1.000
Usbekistan	2.300	2.500	2.300	2.500	3.000	3000
Gesamt	47.260	46.000	45.295	43.059	43.612	43.005

^{a)} Produktionskapazität von bestehenden und beschlossenen Produktionszentren, getragen von Vorräten der Kategorien RAR and EAR-I, die zu Kosten bis zu 80 US\$/kg gewonnen werden können.

NA = Angaben nicht verfügbar oder nicht berichtet

Wie in Tab. 11 zu sehen ist, wurde nicht die gesamte verfügbare Kapazität für die Produktion benötigt. 2003 betrug der Auslastungsfaktor insgesamt 76%, was eine 31 prozentige Produktionssteigerung ohne den Zubau von neuen Kapazitäten ermöglichen würde.

Tab. 11: Uran-Produktionskapazitäten und tatsächliche Produktion [t U/a] 2003 [NEA 2004]

Land	Kapazität ^{a)}	Produktion	Auslastung
Argentinien	0	20	
Australien	9.400	7.572	81%
Brasilien	340	310	91%
Kanada	14.890	10.457	70%
China, Festland	850	750	88%
Tschechien	440	345	78%
Deutschland	0	150	
Indien	230	230	100%
Kasachstan	3.315	3.300	100%
Namibia	4.000	2.036	51%
Niger	3.800	3.143	83%
Pakistan	65	45	69%
Rumänien	100	90	90%
Russland	3.060	3.150	103%
Südafrika	1.270	758	60%
Ukraine	1.000	800	80%
USA	2.200	846	38%
Usbekistan	2.300	1.770	77%
Gesamt	47.260	35.772	76%

^{a)} Produktionskapazität von bestehenden und beschlossenen Produktionszentren, getragen von Vorräten der Kategorien RAR and EAR-I, die zu Kosten bis zu 80 US\$/kg gewonnen werden können.

b. Aktuelle Entwicklungen

• Konventioneller Bergbau - d.h. Bergbau untertage und im Tagebau

Kanada

Cameco hat eine Genehmigung beantragt, die jährliche Produktion des Bergwerks McArthur River um 18% auf 8.500 Tonnen Uran pro Jahr zu erhöhen.

Der Bau des Bergwerks auf der großen Reicherz-Lagerstätte Cigar Lake in Saskatchewan wurde 2004 genehmigt; die geplante Kapazität beträgt 6.930 Tonnen Uran pro Jahr.

Das Projekt Midwest in Saskatchewan bekam 2002 eine Genehmigung für Vorbereitungsarbeiten zur Errichtung eines Bergwerks, bisher wird die Lagerstätte aber noch für eine zukünftige Ausbeutung vorgehalten.

Die geplante „Sue E“- Erweiterung des Bergwerks McClean Lake in Saskatchewan wurde im Dezember 2005 genehmigt.

USA

Mehrere kleinere Uran-Bergwerke im Südwesten von Colorado sind kürzlich wiedereröffnet worden, und weitere Bergwerke sollen bald folgen, wie z.B. das Bergwerk Slick Rock von Cotter Corp. USEG, das plant, die brachliegenden Bergwerke Sheep Mountain in Wyoming wieder in Betrieb zu nehmen.

Von den vier Uranerz-Aufbereitungsbetrieben, die es in den USA noch gibt, produzieren derzeit nur zwei tatsächlich Uran (IUCs Anlage White Mesa in Blanding, Utah mit einer Kapazität von 1.650 Tonnen Uran pro Jahr, und Cotters Anlage in Cañon City, Colorado mit einer Kapazität von 210 Tonnen Uran pro Jahr), teils aus der Verarbeitung verschiedener Abfallmaterialien, und das nur bei einem Bruchteil ihrer tatsächlichen Kapazität. Im November gab Cotter Corp. überraschend die vorläufige Schließung der meisten seiner Bergwerke und der Aufbereitungsanlage wegen mangelnder Wirtschaftlichkeit bekannt. Im März 2005 gab U.S. Energy Corp. (USEG) Pläne zur Wiedereröffnung des Uranerz-Aufbereitungsbetriebs Shooting Canyon in Utah bekannt (750 Tonnen Uran pro Jahr). Die Anlage war 1982 stillgelegt worden, und USEG wollte noch 2002 die Anlage endgültig abreißen – ein Beschluss der mittlerweile

obsolet ist. Die Aufbereitungsanlage Sweetwater von Kennecott in Wyoming (350 Tonnen Uran pro Jahr) befindet sich immer noch in Betriebsbereitschaft.

Afrika

Der Betrieb des Bergwerks Rössing in Namibia, das ursprünglich 2007 wegen Erschöpfung der Lagerstätte geschlossen werden sollte, wird bis 2016 verlängert .

Paladin Resources errichtet derzeit ein Uran-Bergwerk an der Lagerstätte Langer Heinrich in Namibia (848 t U) und plant ein weiteres in Kayelekera in Malawi.

AngloGold plant, seine Produktionskapazität durch die Inbetriebnahme des neuen Goldbergwerks Moab Khotsonq in Südafrikas Vaal River Region zu erhöhen; die Firma erwartet dort auf Erze mit etwas höheren Uran-Gehalten zu stoßen.

Aflease Gold and Uranium Resources hat Pläne aufgegeben, Uran-Reste aus den Aufbereitungsrückständen von Harmony Gold in Südafrika zu gewinnen. Dafür hat die Firma First Uranium nun ein Auge auf die tailings des Goldbergwerkes Buffelsfontein geworfen: Rest-Uran-Gehalt 0,0057%.

Asien

Uranium Corporation of India plant, neue Uran-Bergwerke bei den Armerzlagerstätten Baghjanta und Bandugurang (Jharkhand), Lambapur-Peddagattu (Andhra Pradesh) und Domiasiat (Meghalaya) in Betrieb zu nehmen. Im Moment sieht sich die Firma in den betreffenden Regionen jedoch massivem Widerstand gegenüber. Für Lambapur-Peddagattu wurde im Dezember 2005 die Umweltfreigabe erteilt: Hier soll auf einer Fläche von 526,65 Hektar eine Lagerstätte abgebaut werden, die gerade einmal 5.900 Tonnen Uran enthält: 447,04 Hektar der Fläche sind derzeit noch bewaldet.

Australien

ERA plant, den Bergbau beim nahezu erschöpften Bergwerk Ranger bis 2008 weiterzuführen, die Erzaufbereitung sogar bis 2011. Und ERA hofft immer noch, die Ureinwohner von den Vorteilen eines anschließenden Abbaus der nahe gelegenen großen Lagerstätte Jabiluka überzeugen zu können, obwohl ERA mit ihnen ein Abkommen abgeschlossen hat, das einen Abbau gegen den erklärten Willen der Ureinwohner ausschließt.

WMC prüft derzeit Überlegungen, die Uran-Produktionskapazität des Bergwerks Olympic Dam von derzeit 4.000 Tonnen Uran auf 30.000 Tonnen Uran zu erhöhen und damit mehr als zu versiebenfachen.

Cogéma hat seine Bestrebungen wieder aufgenommen, eine Genehmigung für den Abbau der Lagerstätte Koongarra im Northern Territory zu erhalten, nachdem ein fünfjähriges Moratorium mit den Ureinwohnern am 26. April 2005 ausgelaufen ist.

• **In-situ leach (ISL) Produktion**

USA

Die Genehmigung für HRIs in-situ leach Projekt Crownpoint auf der Navajo Reservation in New Mexico liegt seit 2000 auf Eis. Am 19. April 2005 hat nun der Navajo Nation Council ein Gesetz verabschiedet, das jeglichen Uran-Abbau verbietet. Die Genehmigung für URIs Alta Mesa in-situ leach Projekt in Texas wurde 2002 erteilt. Crow Butte Resources plant, seine in-situ leach Anlagen in Nebraska um bis zu vier Satellitenanlagen zu erweitern.

Asien

Russland richtet gegenwärtig das in-situ leach Projekt Khiagdinskoe in der Burjatischen Republik ein. Die Produktion von 1.500 Tonnen Uran pro Jahr sollte 2005/2006 beginnen.

Kasachstan plant, seine jährliche Uran-Produktion von 3.000 Tonnen auf 12.000 Tonnen im Jahre 2015 zu erhöhen. Dies soll, teils in Joint Ventures mit westlichen Firmen, möglich werden mit der Inbetriebnahme von in-situ leaching an den Lagerstätten Akdal, Karamurun, Zarechnoye (Produktion soll im April 2006 beginnen und dann bis auf 420 Tonnen Uran pro Jahr ansteigen),

Inkay (Produktion soll 2007 beginnen und 2010 dann 2.000 Tonnen Uran pro Jahr erreichen) und Muyunkum (Produktion sollte Ende 2005 beginnen und dann bis auf 1300 Tonnen Uran pro Jahr zunehmen).

Australien

Die Pläne für das in-situ leach Projekt Honeymoon in Südaustralien wurden 2004 auf Eis gelegt.

2. Konversion zu UF₆

Für die Verwendung in Leichtwasser-Reaktoren (LWR) muss das Uran-Konzentrat zunächst gereinigt (raffiniert) werden und von U₃O₈ in Uranhexafluorid (UF₆) umgewandelt werden, da nur diese Verbindung leicht in den gasförmigen Zustand übergehen kann, der für den nachfolgenden Anreicherungsprozess benötigt wird. Die bestehenden Konversions-Kapazitäten sind in Tab. 12 aufgeführt.

Tab. 12: Anlagen für die Konversion zu Uranhexafluorid [WUP HP]

Land	Betreiber	Name/Standort ^{a)}	Kapazität ^{b)} [t U/a]
Brasilien	IPEN	São Paulo	90
Kanada	Cameco	Port Hope, Ontario ^{c)}	10.500
China	CNNC	Lanzhou	400
Frankreich	COMURHEX (100% Cogéma)	Pierrelatte 1 ^{e)}	14.000
		Pierrelatte 2 ^{f)}	350
Iran	AEOI	Isfahan	193
Russland	Rosatom	Ekaterinburg	4.000
		Angarsk	20.000
Großbritannien	British Nuclear Fuels, Ltd.	Springfields, Lancashire	6.000
USA	Honeywell (Converdyn)	Metropolis, Illinois	14000
Gesamt			6.953

^{a)} Konversion von U₃O₈ zu Uranhexafluorid (UF₆), wenn nicht anders angegeben.

^{b)} Nominelle Kapazität

^{c)} UO₃ zu UF₆. U₃O₈ wird in einem Zwischenschritt in Blind River, Ontario, zu UO₃ konvertiert.

^{e)} UF₄ zu UF₆. U₃O₈ wird in einem Zwischenschritt in der Anlage Malvési zu UF₄ konvertiert.

^{f)} Konversion von Wiederaufarbeitungsuran (RepU) zu UF₆.

Cameco will die Produktionskapazität der Uran-Raffinerie Blind River erhöhen. Das raffinierte UO₃ soll zur Konversionsanlage Springfields von BNFL in Großbritannien geschickt werden. Im Jahre 2001 hatte BNFL noch angekündigt, die Anlage Springfields 2006 schließen zu wollen. Im März 2005 unterzeichnete Cameco jedoch einen 10-Jahres-Lohn-Konversionsvertrag mit BNFL, womit die Anlage zumindest für diesen Zeitraum noch in Betrieb bleiben wird.

3. Anreicherung

Die im großtechnischen Maßstab zur Verfügung stehenden Anreicherungsanlagen nutzen zwei unterschiedliche physikalische Effekte aus, um das leichtere Isotop U-235 von dem schwereren U-238 zu trennen: Zum einen ihre unterschiedliche Diffusion durch eine Membrane, zum anderen ihr unterschiedliches Verhalten in einem Schwerfeld, wie es in einer Zentrifuge erzeugt wird. Beide Verfahren erfordern, dass das Uran als Gas vorliegt. Die ersten großtechnisch verfügbaren Anlagen waren Gasdiffusions-Anlagen. Wegen ihres hohen Stromverbrauchs werden sie nun aber nach und nach durch Zentrifugen-Anlagen ersetzt. Tab. 13 führt die verfügbaren Kapazitäten für jede dieser beiden Technologien auf.

Tab. 13: Uran-Anreicherungsanlagen [WUP HP]

Land	Betreiber	Name/Standort	Kapazität ^{a)} [Mio. SWU]
Gasdiffusionsanlagen			
China	CNNC	Lanzhou	0,90
Frankreich	EURODIF	Tricastin	10,80
USA	U.S. Enrichment Corp.	Paducah, Kentucky	11,30
		Portsmouth, Piketon, Ohio (im "cold standby" seit 11. Mai 2001)	7,40
Zwischensumme			30,40
Zentrifugenanlagen			
China	CNNC	Hanzhong	0,50
		Lanzhou	0,50
Deutschland	Urenco	Gronau	1,46
Japan	JNC	Ningyo Toge	0,20
	Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL)	Rokkasho-mura	1,05
Niederlande	Urenco	Almelo	1,95
Pakistan	Pakistan Atomic Energy Commission (PAEC)	Kahuta	0,005
Russland	Rosatom	Urals Electrochemical Integrated Enterprise (UEIE), Novouralsk (ehemals Sverdlovsk-44, bei Jekaterinburg)	7,00
		Siberian Chemical Combine (SKhK), Seversk (ehemals Tomsk-7)	4,00
		Electrochemical Plant (ECP), Zelenogorsk (ehemals Krasnoyarsk-45)	3,00
		Angarsk Electrolytic Chemical Combine (AEKhK), Angarsk	1,00
Großbritannien	Urenco	Capenhurst	2,44
Zwischensumme			23,11
Gesamt			53,51

a) Nominelle Kapazität

SWU = Separative Work Unit

Portsmouth: "cold standby" bedeutet, dass die Anlage in einem solchen Zustand gehalten wird, dass sie bei Bedarf innerhalb von 18 bis 24 Monaten wieder in Betrieb gehen könnte.

Die Kapazitäten der Anreicherungsanlagen von Urenco in Deutschland, den Niederlanden und Großbritannien werden laufend erweitert. Die Anlage in Gronau erhielt im Februar 2005 die Genehmigung für den Ausbau von 1,8 auf 4,4 Mio. SWU pro Jahr. Die Anlage in Almelo erhielt 2004 die Genehmigung für einen Ausbau von 2,8 auf 3,5 Mio. SWU, die Genehmigung wurde später jedoch aus formalen Gründen aufgehoben; ein neues Genehmigungsverfahren ist derzeit im Gange.

Zentrifugenanlagen sind im Bau in Resende, Brasilien und Natanz, Iran.

Weitere Zentrifugenanlagen sind geplant:

- National Enrichment Facility (NEF), Eunice, New Mexico, USA (LES/Urenco), der Baubeginn wird für 2006 erwartet, die Inbetriebnahme für 2008, und die volle Kapazität von drei Mio. SWU soll 2013 erreicht werden.
- American Centrifuge Plant, Piketon, Ohio, USA (USEC), die zunächst vorgesehene Kapazität von 3,5 Mio. SWU soll 2010 erreicht werden.
- Georges Besse II Anlage, Tricastin, Frankreich (Eurodif/Cogéma), der Produktionsbeginn ist für 2007 vorgesehen, und die volle Kapazität von 7,5 bis 11 Mio. SWU pro Jahr soll 2016 erreicht werden.

Die beiden letzteren Anlagen sollen die an den jeweiligen Standorten bestehenden Diffusionskapazitäten ersetzen.

Die russische Atombehörde Rosatom wendet zurzeit sieben Mio. SWU pro Jahr für die Wiederanreicherung von abgereichertem Uran auf, das sie von Cogéma und Urenco erhält (siehe S. 18); zusätzlich benutzt Rosatom auch noch eigenes Material zur Wiederanreicherung.

Die Anreicherung von einer Tonne Unat (als U_3O_8) auf 3,6% erfordert 560 SWU (bei einem tails assay von 0,3%):

Die Gesamtkapazität von 53,51 Mio. SWU pro Jahr ermöglicht daher die Anreicherung von ca. 95.500 Tonnen Unat zu 11.800 Tonnen Uenr mit 3,6%, wenn tatsächlich die ganze Kapazität für die Anreicherung von Natururan benutzt würde und keine Kapazitäten für die Wiederanreicherung von abgereichertem Uran belegt würden.

Der Verbrauch von 8,1 Tonnen Unat pro erzeugter Tonne Uenr kann auf Kosten der aufzuwendenden SWU gesenkt werden, indem ein niedriger tails assay eingestellt wird: Mit einem abgesenkten tails assay von 0,25% würde dieselbe Kapazität von 53,51 Mio. SWU pro Jahr ausreichen, etwa 78.000 Tonnen Unat zu 10.700 Tonnen Uenr mit 3,6% anzureichern (also 7,3 t Unat pro t Uenr), und, bei einem noch weiter abgesenkten tails assay von 0,2% könnten etwa 63.500 Tonnen Unat zu 9.500 Tonnen Uenr mit 3,6% angereichert werden (also 6,7 t Unat pro t Uenr). Solche niedrigeren tails assay können interessant werden, wenn der Preis für Uran-Konzentrat weiterhin schneller ansteigt als der für Anreicherung.

4. Herstellung von Nuklearbrennstoff

Die Kapazitäten für die Herstellung von Leichtwasser-Reaktor-Brennstoff sind in Tab. 14 aufgeführt, die für Mischoxid-Brennstoff (MOX) in Tab. 15. Die ersteren Kapazitäten beinhalten auch die Dekonversion des angereicherten Urans von UF_6 zur Uranoxid-Form.

MOX-Brennstoff mit einem Inhalt von 0,122 Tonnen HM (bestehend aus etwa 8 kg Plutonium und 114 kg Unat) ersetzt den Uranoxid-Brennstoff, der aus einer Tonne Unat durch Anreicherung auf 3,6% hergestellt werden kann; insgesamt werden also 0,886 Tonnen Unat ersetzt.

Die (ziemlich theoretische) MOX-Kapazität von 460 Tonnen HM ersetzt also etwa 3.770 Tonnen Unat und benötigt selbst 430 Tonnen Unat, so dass insgesamt 3.340 Tonnen Unat ersetzt werden.

Die MOX-Brennstoff-Fabrik von Cogéma in Cadarache hat 2004/2005 die Test-Brennelemente für das US-MOX-Programm hergestellt, obwohl die Anlage 2003 wegen der Erdbebengefahr offiziell geschlossen worden war.

Der Bau der MOX-Brennstoff-Fabrik von BNFL in Sellafield ist bereits seit Jahren abgeschlossen, trotzdem funktioniert die Anlage nicht wie vorgesehen. Im Oktober 2004 hat BNFL dann seinen schärfsten Wettbewerber Cogéma zu Hilfe gerufen, um die Anlage zum Laufen zu bringen.

Derzeit geplante Projekte für neue MOX-Fabrikationsanlagen umfassen:

- Savannah Riversite in South Carolina (Duke, Cogema, Stone and Webster, 70 MTHM/a) und eine ähnliche Anlage in Seversk, Russland
- Lanzhou, China (ehemalige Siemens MOX-Anlage aus Hanau?)
- JNFL Rokkasho, Japan (130 t MOX/a)

Die Kapazitäten für die Herstellung von Brennstoff für Schwerwasser-Reaktoren (HWR) sind in Tab. 16 angeführt. Dieser Brennstoff wird aus Natururan hergestellt, es wird keine Anreicherung benötigt.

Cameco hatte vor, Anlagen für das Mischen eines neuen Brennstofftyps für die CANDU-Reaktoren in Port Hope zu errichten (slightly enriched uranium (SEU) blending project). Das Projekt wurde jedoch im September 2005 nach Protesten aus der Bevölkerung abgeblasen; die Arbeiten sollen nun ins Ausland vergeben werden.

Cameco will die Kapazität der Uran-Raffinerie Blind River erweitern. Das raffinierte UO_3 soll dann in die Konversionsanlage Springfields von BNFL in Großbritannien geschickt werden.

Tab. 14: Uranoxid-Brennstoff-Fabriken für Leichtwasser-Reaktoren [WUP HP]

Land	Betreiber	Name/Standort	Kapazität ^{a)} [t U/a]
Belgien	FBFC (49% Cogéma, 51% Framatome)	Dessel	750
Brasilien	FEC (INB)	Resende	100
China	CNNC	Yibin	100
Frankreich	FBFC (49% Cogéma, 51% Framatome)	Romans-sur-Isère	820
	SICN (100% Cogéma)	Veurey-Voroise	150
Deutschland	Advanced Nuclear Fuels (66% Areva, 34% Siemens)	Lingen	650
Indien	Nuclear Fuel Complex	Hyderabad	25
Japan	Japan Nuclear Fuel Co., Ltd.	Yokosuka City	750
	Mitsubishi Nuclear Fuel	Tokai-Mura	440
	Nuclear Fuels Industries	Kumatori	284
		Tokai-Mura	200
Kasachstan	Ulba Metallurgical Co	Kamenogorsk	2.000
Südkorea	KEPCO Nuclear Fuel Co., Ltd. (KNFC)	Taejon	400
Pakistan	Pakistan Atomic Energy Commission (PAEC)	Kundian	?
Russland	JSC TVEL	Elektrostal	1.020
		Novosibirsk	1.000
Spanien	ENUSA	Juzbado	300
Schweden	BNFL/Westinghouse Atom	Västerås	600
Großbritannien	British Nuclear Fuels, Ltd.	Springfields, Lancashire	330
USA	Framatome ANP, Inc.	Lynchburg, Virginia	400
	Westinghouse (100% BNFL)	Columbia, S. Carolina	1.150
	Framatome ANP (66% Areva, 34% Siemens)	Richland, Washington	700
	Global Nuclear Fuel - Americas, L.L.C.	Wilmington, N. Carolina	1200
Gesamt			13.369

^{a)} Nominelle Kapazität

Eine Tonne Unat (als U_3O_8) ergibt 0,122 Tonnen Uran als angereichertes UO_2 (angereichert auf 3,6%, bei einem tails assay von 0,3%).

Eine Kapazität von 13.369 Tonnen Uenr erfordert also die ursprüngliche Bereitstellung von 109.582 Tonnen Unat.

Tab. 15: Mischoxid (MOX)-Brennstoff-Fabriken [WUP HP]

Land	Betreiber	Name/Standort	Kapazität ^{a)} [MTIHM/a]
Belgien	Belgonucléaire SA	Dessel	37
Frankreich	Cogéma	Cadarache (geschlossen?!)	40
	MELOX (50% Cogéma, 50% Framatome)	Marcoule	195
Indien	DAE	Tarapur	50
Japan	JNC	Tokai-Mura	10
Großbritannien	British Nuclear Fuels, Ltd.	Sellafield (funktioniert nicht)	128
Gesamt			460

^{a)} Nominelle Kapazität

MTIHM = metric tonnes of initial heavy metal.

Tab. 16: Fabriken für Schwerwasser-Reaktor-Brennstoff [WUP HP]

Land	Betreiber	Name/Standort	Kapazität ^{a)} [t U/a]
Argentinien	67% Pecom-Nuclear S.A., 33% CNEA	Ezeiza	160
Kanada	Zircatec Precision Industries	Port Hope, Ontario ^{b)}	1.500
	General Electric Canada	Peterborough, Ontario ^{c)}	1.200
Indien	DAE Nuclear Fuel Complex	Hyderabad	135
		Trombay	135
Südkorea	KEPCO Nuclear Fuel Co., Ltd. (KNFC)	Taejon	400
Pakistan	Pakistan Atomic Energy Commission (PAEC)	Chashma	20
Gesamt			3.550

^{a)} Nominelle Kapazität

^{b)} Nur Verarbeitung von UO₂ Konversion von U₃O₈ zu UO₃ in Camecos Anlage Blind River und Konversion von UO₃ zu UO₂ in Camecos Anlage Port Hope.

^{c)} UO₂ Brennstoff-Tabletten werden in GE Canada Inc's Anlage in Toronto hergestellt und dann in Peterborough zu Brennelementen zusammengesetzt.

5. Kombinierte Daten zu Kapazitäten

Tab. 17 zeigt eine Zusammenstellung der Kapazitäts-Angaben, die für die Anlagen der Brennstoff-Herstellung verfügbar sind.

Tab. 17: Kapazitäten für die Herstellung von Nuklear-Brennstoff, 2004

	Nominelle Kapazität	Einheit	Skalierfaktor	Kapazität [t Unat äquiv.]
Uran-Bergbau und Erzaufbereitung ^{a)}	46.000	t U als U ₃ O ₈	1	46000
Konversion	69.533	t U als U ₃ O ₈	1	69533
Anreicherung	53.505.000	SWU	1/560	95545
Brennelement-Fabrikation	UOX	13.369	t U als UO ₂	109.582
	MOX	460	t HM	3.341
	HWR	3.550	t U als UO ₂	3.550

^{a)} Produktionskapazität von bestehenden und beschlossenen Produktionszentren, getragen von Vorräten der Kategorien RAR and EAR-I, die zu Kosten bis zu 80 US\$/kg gewonnen werden können.

Konversionsverlust: 0,5%, Anreicherung auf 3,6% (tails assay 0,3%), Verlust bei Brennstoffherstellung: 1%

Die Kapazitäten sind in den originalen Einheiten und als Tonnen Natur-Uran-Äquivalent angegeben. Letztere Angabe erleichtert Vergleiche, da sie aufzeigt, wie viel Natururan eigentlich benötigt wird, um die Produktion bei der angegebenen Kapazität auszufüllen bzw. zu ersetzen. Schätzungen für zukünftige Kapazitäten konnten nur für Uran-Bergbau und Uranerz-Aufbereitung ausfindig gemacht werden (siehe Tab. 10).

6. Einflussfaktoren auf Produktionskapazitäten

- **Risiken aufgrund der Abhängigkeit von einer kleinen Zahl großer Produzenten**

Dadurch dass eine kleine Anzahl von Bergwerken einen großen Anteil zur Uran-Produktion beisteuert, wird die Uran-Versorgung der Welt ziemlich anfällig. Das haben zwei größere Brände beim Uranerz-Aufbereitungsbetrieb des Bergwerks Olympic Dam in Australien in den Jahren 1999 und 2001 sowie ein schwerer Wassereinbruch in das Bergwerk McArthur River in Kanada im Jahre 2003 gezeigt, die alle mit Produktionsausfällen verbunden waren.

- **Risiken aufgrund des hohen Anteils sekundärer Quellen**

Gegenwärtig trägt die primäre Produktion aus dem Bergbau gerade einmal 52% zur Uran-Versorgung bei. Wenn es zu einer Unterbrechung der sekundären Quellen (aus welchem Grund auch immer) kommen sollte, müsste die Produktion aus dem Bergbau fast verdoppelt werden.

- **Auslaufen der sekundären Quellen erfordert Erhöhung der primären Produktion**

Mehrere sekundäre Quellen, wie das Strecken von HEU, die Lagerbestände an Natururan und LEU und die Wiederanreicherung von abgereichertem Uran stehen vermutlich nur noch begrenzte Zeit zur Verfügung, da die überschüssigen Bestände aufgebraucht werden und die überschüssigen Anreicherungs-kapazitäten für die Wiederanreicherung nicht länger zur Verfügung stehen werden.

- **Lange Vorlaufzeiten für die Inbetriebnahme neuer Bergwerke**

Die Einrichtung neuer Bergwerke erfordert Zeiträume von zehn und mehr Jahren; größere Produktionszuwächse können daher nicht auf die Schnelle erzielt werden. Zudem sind in den zehn Jahren noch nicht die Zeiten enthalten, die benötigt werden, um eine Lagerstätte genauer zu untersuchen, so dass aus einem Uran-Fund eine abbaubare Lagerstätte werden kann.

- **Neue Kapazitäten sind überwiegend nur auf Armerzlagerstätten möglich**

Da die Uran-Vorräte in Reicherzlagerstätten sehr beschränkt sind, müsste jede nennenswerte Produktionssteigerung auf Armerzlagerstätten zurückgreifen, was zu sehr großen Dimensionen der Abbaubetriebe und enormen Umweltauswirkungen führen würde.

D. Uran-Angebot und Nachfrage

1. Uran-Lieferanten

Die folgenden Tabellen zeigen die Struktur der Uran-Versorgung nach Erzeugerländern (Tab. 18, Abb. 15, Abb. 16), Bergwerken (Tab. 19), Bergwerkstyp und Firmen (Tab. 21).

Tab. 18: Jährliche Uran-Produktion nach Ländern, 2003 [WNA HP]

Rang	Land	t U	Anteil	Kumul. %	Anm.
1.	Kanada	10.457	29,2%	29,2%	
2.	Australien	7.572	21,2%	50,4%	
3.	Kasachstan	3.300	9,2%	59,6%	
4.	Russland	3.150	8,8%	68,4%	c)
5.	Niger	3.143	8,8%	77,2%	
6.	Namibia	2.036	5,7%	82,9%	
7.	Usbekistan	1.770	4,9%	87,9%	
8.	USA	846	2,4%	90,2%	
9.	Ukraine	800	2,2%	92,5%	c)
10.	Südafrika	758	2,1%	94,6%	a)
11.	China, Festland	750	2,1%	96,7%	c)
12.	Tschechien	345	1,0%	97,6%	
13.	Brasilien	310	0,9%	98,5%	
14.	Indien	230	0,6%	99,1%	c)
15.	Deutschland	150	0,4%	99,6%	b)
16.	Rumänien	90	0,3%	99,8%	c)
17.	Pakistan	45	0,1%	99,9%	c)
18.	Argentinien	20	0,1%	100,0%	
	Welt Gesamt	35.772	100,0%		

a) Uran ist Nebenprodukt von Goldbergbau

b) Produktion aus Stilllegungsmaßnahmen

c) WNA-Schätzung

Abb. 15: Uran-Produktion nach Ländern, 2003

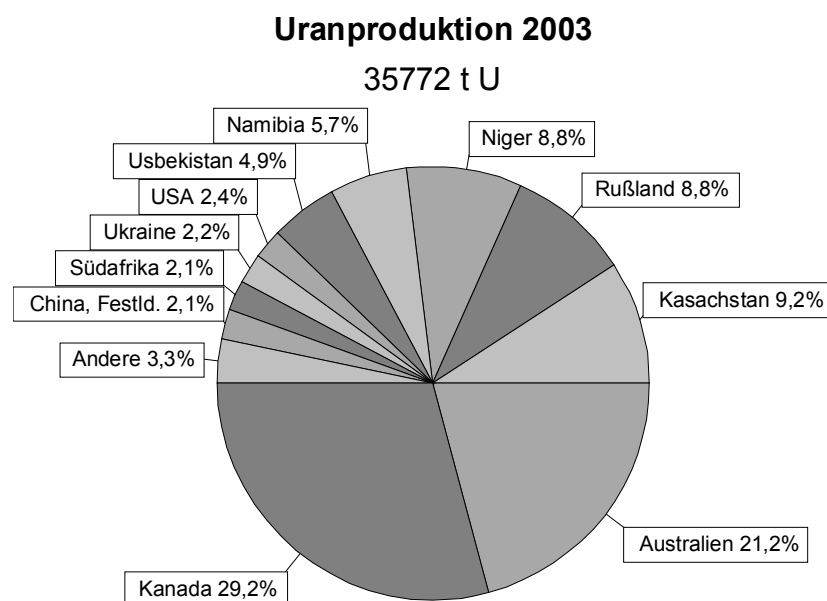
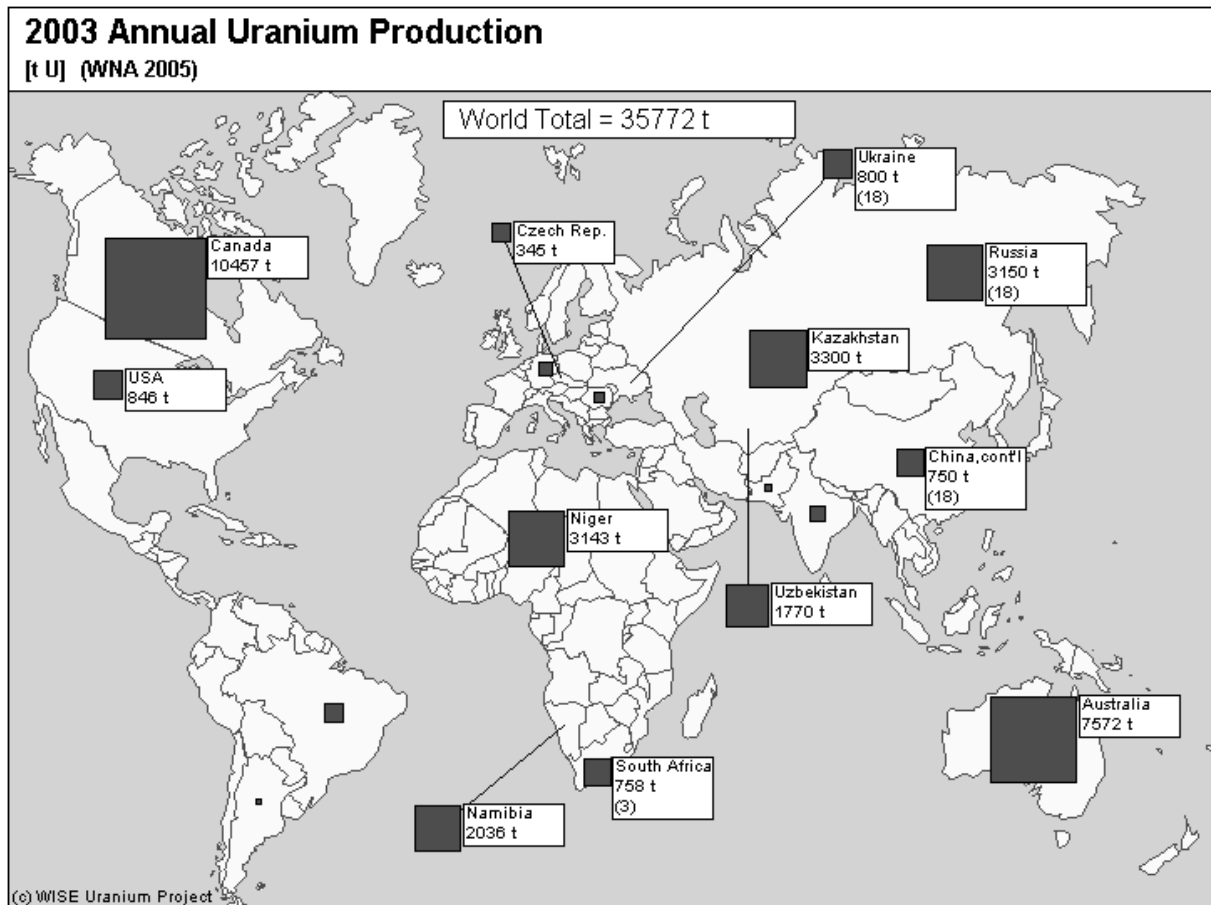


Abb. 16: Weltkarte der Uran-Produktion, 2003



t = metric tonne · NA = Data not available

Tab. 19: Uran-Produktion nach Bergwerk ^{a)}, 2003

Rang ^{a)}	Bergwerk	Land	Betreiber	Uran-Konz. [% U] ^{b)}	Typ	Prod. [t U]	Anteil
1.	McArthur River (+ Key Lake)	Kanada	Cameco	17,96%	UG	5.831	16,3%
2.	Ranger	Australien	ERA (Rio Tinto 68%)	0,24%	OP	4.295	12,0%
3.	Olympic Dam	Australien	WMC	0,053%	BP/UG	2.693	7,5%
4.	McClellan Lake	Kanada	Cogéma	2,00%	OP	2.318	6,5%
5.	Rabbit Lake	Kanada	Cameco	1,10%	UG	2.281	6,4%
6.	Rössing	Namibia	Rio Tinto (69%)	0,029%	OP	2.036	5,7%
7.	Akouta	Niger	Cogéma/Onarem	0,38%	UG	2.017	5,6%
8.	Arlit	Niger	Cogéma/Onarem	0,30%	OP	1.126	3,1%
9.	Vaal River	S. Afrika	Anglogold/Nufcor		BP/UG	758	2,1%
10.	Beverly	Australien	Heathgate	0,15%	ISL	584	1,7%
	Andere					11.811	33,0%
	Welt Gesamt					35.772	100,0%

^{a)} Produktion nach Bergwerken nur für westliche Welt verfügbar; nach [WNA HP]^{b)} aus Tab. 2

BP = Nebenprodukt, ISL = in-situ leaching, OP = Tagebau, UG = Untertage-Bergwerk

Die kumulierte Prozentangabe in Tab. 18 zeigt, ebenso wie Abb. 15, dass z.B. die beiden wichtigsten Produktionsländer die Hälfte der Gesamtproduktion liefern, oder die wichtigsten fünf Produktionsländer mehr als drei Viertel der Produktion.

Tab. 20: Uran-Produktion nach Bergwerkstyp, 2003 [WNA HP]

Rang	Typ	Anteil
1.	Untertage (UG)	41%
2.	Tagebau (OP)	28%
3.	In-situ leach (ISL)	20%
4.	Nebenprodukt (BP)	11%

(wobei Olympic Dam in der Nebenprodukt- und nicht in der Untertage-Kategorie geführt wird)

Tab. 21: Uran-Produktion nach Firma, 2003 [WNA HP]

Rang	Firma	mit Bergwerken in	t U	Anteil
1.	Cameco	Kanada, USA	7.194	20.1%
2.	Cogéma	Kanada, USA, Niger	4.738	13.2%
3.	ERA	Australien	4.295	12.0%
4.	KazAtomProm	Kasachstan	3.235	9.0%
5.	Priargunsky	Russland	2.800	7.8%
6.	WMC	Australien	2.693	7.5%
7.	Rössing	Namibia	2.036	5.7%
8.	Navoi	Usbekistan	1.770	4.9%
	Andere		7.011	19.6%
	Welt Gesamt		35.772	100.0%

2. Uran-Abnehmer

Der jährliche Uran-Bedarf für Atomkraftwerke und die Atomstromproduktion sind in Tab. 22 und Abb. 17 nach Ländern aufgeführt. Der Atomstromanteil ist in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich: Einige wenige Länder, wie Litauen, Frankreich, Slowakei und Belgien sind in hohem Maße (größer als 50%) von Atomstrom abhängig. In den USA, dem Land mit dem absolut höchsten Atomstromverbrauch, macht der Atomstromanteil dagegen nur 20% aus; in den größten wirtschaftlich aufstrebenden Ländern China und Indien macht die Atomstromproduktion nur einen minimalen Anteil aus.

Der Beitrag der verschiedenen Energiequellen zur Stromproduktion ist in Tab. 23 angegeben: Atomstrom hat nur einen Anteil von 16,5% an der gesamten Welt-Stromproduktion; die fossilen Energieträger Kohle, Gas und Öl haben zusammen einen Anteil von 65%. Tab. 24 zeigt den Anstieg der Stromproduktion bis 2030, wie er von der OECD International Energy Agency (IEA) vorhergesagt wird. Bemerkenswerterweise geht die IEA von einer nahezu gleichbleibenden Atomstrom-Produktion aus.

Tab. 22: Jährlicher Uran-Bedarf für Reaktoren [NEA 2004], Stromproduktion aus Atomenergie 2003 [atw 4/2004] und Nuklearanteil an Gesamtstromproduktion

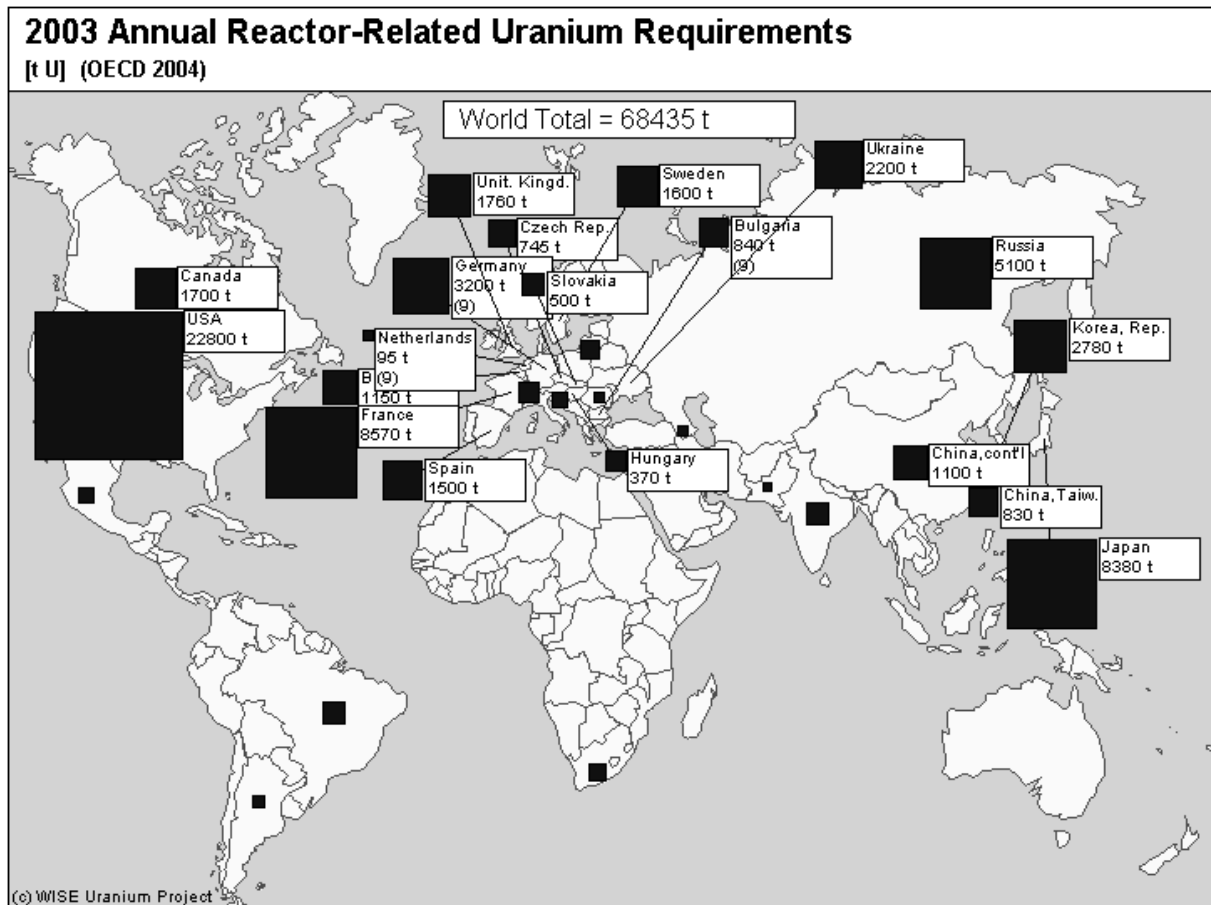
Rang	Land	t U	TWh	Nuklear-anteil
1.	USA	22.800	799,0	20%
2.	Frankreich	8.570	449,0	77%
3.	Japan	8.380	230,0	25%
4.	Russland	5.100	148,6	16,5%
5.	Deutschland ^{a)}	3.200	165,1	29%
6.	Korea, Rep.	2.780	123,3	40%
7.	Ukraine	2.200	81,5	45,1%
8.	Großbritannien	1.760	88,6	25%
9.	Kanada	1.700	75,8	13%
10.	Schweden	1.600	65,0	49,2%
11.	Spanien	1.500	61,9	23,6%
12.	Belgien	1.150	47,4	56%
13.	China, Festld. ^{c)}	1.100	43,8	2,3%
14.	Bulgarien ^{a)}	840	17,3	40%
15.	China, Taiwan	830	37,4	21,5%
16.	Tschechien	745	25,9	30,5%
17.	Finnland	500	22,0	25,8%
18.	Slowakei	500	18,0	57,8%
19.	Indien	465	16,4	3,3%
20.	Brasilien	450	13,3	3,6%
21.	Schweiz	375	27,3	40%
22.	Ungarn	370	11,0	32,7%
23.	Litauen	310	15,5	80,6%
24.	Südafrika	280	13,3	6%
25.	Mexiko ^{a)}	230	10,5	4%
26.	Slowenien ^{b)}	230	5,3	43,4%
27.	Argentinien	120	7,0	9%
28.	Rumänien ^{a)}	100	4,5	9,3%
29.	Niederlande ^{a)}	95	3,8	4,5%
30.	Armenien	90	1,8	35%
31.	Pakistan ^{a)}	65	1,8	2,3%
	Welt Gesamt	68.435	2.631,10	

^{a)} Uran-Bedarf: Schätzung des Sekretariats

^{b)} Stromproduktionszahlen aus [atw 10/2004]

^{c)} Stromproduktionszahlen aus [Xinhua Sep. 1, 2004]

Abb. 17: Weltkarte des Reaktor-bezogenen Uran-Bedarfs, 2003



t = metric tonne · NA = Data not available

Tab. 23: Stromproduktion der Welt nach Energieträgern, 2002 [IEA 2005]

Rang	Produktion aus	TWh	Anteil
1.	Kohle	6265,1	38,8%
2.	Gas	3064,88	19,0%
3.	Wasserkraft	2676,16	16,6%
4.	Atomkraft	2660,441	16,5%
5.	Öl	1160,8	7,2%
6.	Biomasse	139,286	0,86%
7.	Müll	55,908	0,35%
8.	Geothermie	52,236	0,32%
9.	Solar thermisch	0,569	0,0035%
10.	Solar Photovoltaik	0,412	0,0025%
	Andere Quellen	54,354	0,34%
	Gesamt	16129,164	100,0%

Tab. 24: Bruttostrom-Erzeugung der Welt [IEA 2002]

	Brutto Erzeugung [TWh]				Mittl. Jährl. Wachstum 2000-2030
	2000	2010	2020	2030	
Kohle	5.989	7.143	9.075	11.590	2,2%
Öl	1.241	1.348	1.371	1.326	0,2%
Gas	2.676	4.947	7.696	9.923	4,5%
Wasserstoff – Brennstoffzellen	0	0	15	349	–
Atomkraft	2.586	2.889	2.758	2.697	0,1%
Wasserkraft	2.650	3.188	3.800	4.259	1,6%
Andere erneuerbare	249	521	863	1.381	5,9%
Gesamt	15.391	20.037	25.578	31.524	2,4%

Der Beitrag der Atomenergie zur *Primärenergie*produktion ist noch niedriger – etwas über sieben Prozent, wie in Tab. 25 und Tab. 26 zu sehen.

Tab. 25: Primärenergiebedarf der Welt [Mtoe] [IEA 2002]

	1971	2000	2010	2030	Mittl. Jährl. Wachstum 2000-2030
Öl	2.450	3.604	4.272	5.769	1,6%
Kohle	1.449	2.355	2.702	3.606	1,4%
Gas	895	2.085	2.794	4.203	2,4%
Atomenergie	29	674	753	703	0,1%
Wasserkraft	104	228	274	366	1,6%
Andere erneuerbare	73	233	336	618	3,3%
Gesamt	4.999	9.179	11.132	15.267	1,7%

Mtoe = Mio. t Öläquivalent

Tab. 26: Anteil der Atomenergie am Primärenergiebedarf der Welt [IEA 2002]

	1971	2000	2010	2030
Atomenergieanteil	0,6%	7,3%	6,8%	4,6%

3. Uran-Handel

Tab. 27 zeigt, wohin das Uran geht, das in den beiden wichtigsten Produzentenländern Kanada und Australien gewonnen wird. Wichtige Abnehmerländer sind, wenig überraschend, die größten Verbraucherländer USA, Frankreich und Japan. Tab. 28 zeigt die Herkunftsländer für das Uran, das an die Energieversorger in den beiden großen Verbrauchsregionen USA und EU ausgeliefert wurde.

Tab. 27: Bestimmungsländer für Uran-Exporte aus Kanada und Australien [t U]

Bestimmungs- land	Herkunftsland	
	Kanada ^a 2002	Australien ^b 2003
Argentinien	5	
Belgien		75
China	213	
Finnland		95
Frankreich	4.385	748
Deutschland	42	135
Japan	1.366	1.982
Mexiko	114	
Südkorea	217	789
Spanien	126	
Schweden	73	440
Taiwan	220	
Großbritannien	88	738
USA	4.683	3.027
Gesamt	11.534	8.028

^{a)} Canadian Uranium Exports, by Country of Final Destination [NRCAN 2004]

^{b)} Countries to which Australian Uranium was supplied [ASNO AR 2004]

Tab. 28: Herkunftsländer von Uran, das an Energieversorger in den USA und der EU ausgeliefert wurde [t U]

Herkunftsland	Ziel	
	USA ^{a)} 2004	EU ^{b)} 2003
Australien	4.484	2.624
Kanada	6.334	3.280
China	0	
Tschechien	0	
EU		328
Kasachstan	1.620	984
Usbekistan	886	
Namibia	1.069	656
Südafrika	804	
Niger	0	2.460
Russland	3.973	3.444
Ukraine	0	
Großbritannien	0	
USA	4.747	
Andere + unbestimmt		492
<i>Zwischensumme W</i>	738	
Wiederangereicherte tails (Russland)		984
Gestrecktes HEU		1.312
Gesamt	24.654	16.400

W = zurückgehalten

^{a)} Uranium Purchased by Owners and Operators of U.S. Civilian Nuclear Power Reactors [DOE EIA 2005], umgerechnet (1000 lbs U₃O₈ = 0.3846 t U)

^{b)} Origins of natural uranium delivered to European Union utilities [ESA AR 2003], nur ungefähre Werte, berechnet aus dem %-Anteil, keine Aufteilung unter den EU-Mitgliedsländern angegeben

4. Nachfrageszenarien

Szenarien für den zukünftigen Uran-Bedarf sind von unterschiedlichen Institutionen aufgestellt worden, und sie sagen fast jeden beliebigen Anstieg oder Rückgang vorher. Hier werden die Szenarien der IAEA für den Zeitraum 2000 bis 2050 als Beispiele für mögliche Entwicklungen verwendet, ohne zu bewerten, wie wahrscheinlich diese Vorhersagen sind (siehe Tab. 29) [NEA 2004], [IAEA 2001a]. Die Szenarien werden in leicht veränderter Form benutzt, um aktuelle Entwicklungen seit 2000 einzubeziehen.

- Niedriger Bedarf: Mittleres Wirtschaftswachstum; Ausstieg aus der Atomenergie
- Mittlerer Bedarf: Mittleres Wirtschaftswachstum; ständige aber mäßige Zunahme der Atomenergie
- Hoher Bedarf: Hohes Wirtschaftswachstum; bedeutende Zunahme der Atomenergie

Zu Illustrationszwecken wurde ein weiteres Szenario dazu genommen, bei dem die Atomenergie so stark ausgebaut wird, dass sie 2050 sämtliche Stromerzeugung aus fossilen Quellen ersetzen kann – mit dem Ziel, den Treibhauseffekt zu bekämpfen (ohne tiefer in die Fragestellung einzusteigen, ob das überhaupt funktionieren würde). Da die Atomenergie zurzeit einen Anteil von 16,5% an der Stromproduktion der Welt hat, müsste die Stromerzeugung aus Atomenergie um den Faktor fünf erhöht werden, um den derzeitigen Anteil der fossilen Energieträger von 65% an der Stromproduktion zu ersetzen. In Anbetracht des zu erwartenden Anstiegs des Gesamtstromverbrauchs müsste die Stromerzeugung aus Atomenergie allerdings noch viel mehr gesteigert werden, z.B. etwa 15-fach, wenn man eine Verdreifachung des Strombedarfs bis 2050 annimmt, wie aus der Tab. 24 extrapoliert werden kann. Wir definieren also das zusätzliche Szenario wie folgt:

- Ultimativer Bedarf: Die Atomenergie-Kapazitäten würden zwischen 2010 und 2050 soweit hochgefahren, dass die gesamte Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern bei einem verdreifachten Verbrauch ersetzt werden würde

In Anbetracht der derzeitigen Zahl von etwa 440 Atomkraftwerken müssten dann also 6.160 neue Atomkraftwerke gebaut werden, das wären 154 pro Jahr oder drei pro Woche – und das ohne etwa notwendig werdenden Ersatz für alte Kraftwerke zu berücksichtigen.

Dennoch würde auch in diesem extremen Fall, dass alle Elektrizität aus fossilen Energieträgern durch Atomenergie ersetzt werden sollte, der Großteil der *Primärenergie* immer noch aus fossilen Energieträgern gedeckt, da selbst in diesem Fall die Atomenergie nicht mehr als 35% des Primärenergiebedarfs decken würde.

Tab. 29: Übersicht über die Szenarien für den Uran-Bedarf 2000 - 2050

Bedarfsfall	Bedarf im Jahr 2050 [t U]	Bedarfsänderung gegenüber 2000 ^{a)}	Kumul. Bedarf 2000-2050 [t U]
Niedrig	52.000	-16%	3.575.973
Mittel	177.000	+187%	5.528.558
Hoch	283.000	+359%	7.622.035
Ultimativ	924.000	+1400%	21.256.965

^{a)} basierend auf 61.600 t U im Jahre 2000

Eine Reihe von Faktoren könnte einen Einfluss auf den zukünftigen Bedarf haben:

- **Höherer Brennstoffabbrand**

Atomkraftwerke setzen zunehmend Brennstoff mit höheren Anreicherungsgraden ein, und der Brennstoff verbleibt länger im Reaktor und produziert mehr Strom pro Einheit Brennstoff. Der Natururan-Bedarf pro erzeugter Einheit Elektrizität ändert sich dadurch zwar kaum, aber der verbrauchte Brennstoff ist dann für eine Wiederaufbereitung noch weniger geeignet, da er mehr

unerwünschte Isotope enthält. Die Abtrennung von Uran und Plutonium aus den abgebrannten Brennstäben würde also schwieriger (siehe IAEA 1993 für Einzelheiten dazu).

- **Ausstieg aus der Atomenergienutzung in Schweden und Deutschland**

Mit einem Uran-Bedarf von 1.600 bzw. 3.200 Tonnen Uran verbrauchten die schwedischen und deutschen Atomkraftwerke im Jahre 2003 zusammen sieben Prozent des Weltbedarfs. Falls andere Länder auf dem Weg zum Ausstieg nicht folgen, bliebe die Auswirkung auf den Welt-Uran-Bedarf, verglichen mit anderen Einflüssen, bescheiden.

- **Pläne für eine Erweiterung der Atomenergienutzung in China**

China hat angekündigt, dass es in den nächsten 15 Jahren 40 neue Atomkraftwerke bauen will, eine starke Zunahme gegenüber früheren Plänen [BBC News April 7, 2005].

- **Schnelle Brutreaktoren?**

Die Schnelle-Brüter-Technologie versprach einst, die Reichweite der Uran-Vorräte um einen Faktor bis zu 60 zu verlängern. Technische Probleme haben jedoch zur Stilllegung sämtlicher Prototyp-Reaktoren geführt, bis auf einen in Russland. Russland und China betrachten diese Technologie dennoch immer noch als mögliche Option zur Deckung ihres Strombedarfs.

[...] Anatoly Zrodnikov, Generaldirektor des Institute of Physics & Power Engineering (IPPE), sagte, dass Russland beim Bau von mit flüssigem Metall gekühlten Brutreaktoren weltweit führend ist. Die Inbetriebnahme des Reaktors BN-800 mit einem Brennstoff aus einem Uran-Plutonium-Gemisch wird Russland einen Vorsprung von 10 bis 15 Jahren sichern. Experten meinen, dass die russische Erfahrung auf diesem Gebiet gefragt ist und dass Russland zum führenden Exporteur für Brutreaktoren werden könnte, wenn diese Technologie gefragt wäre. Sie beziehen sich dabei insbesondere auf China, das ihren Angaben zufolge 100 schnelle Brutreaktoren bauen will [NW April 21, 2005].

5. Reichweite der Uran-Vorräte

In erster Näherung können wir die Reichweite der bekannten Uran-Vorräte bei angenommener gleichbleibender Nachfrage betrachten. Die bekannten Vorräte (RAR + EAR I), die bei Kosten bis zu 130 US\$/kg Uran gewinnbar sind, betragen 4,58 Mio. Tonnen Uran und würden ausreichen, den gegenwärtigen Verbrauch von 68.435 Tonnen Uran (2003) für 67 Jahre zu decken. Die sekundären Vorräte von Plutonium, HEU, Lagerbeständen von LEU und Unat würden weitere 0,25 Mio. Tonnen Uran oder 3,6 Jahre hinzufügen. Die gesamte Reichweite wäre also etwa 70 Jahre, unter Vernachlässigung von Wiederanreicherung von abgereichertem Uran und Gebrauch von MOX-Brennstoff, für welche ein Vorrat nicht einfach angegeben werden kann.

Für eine zweite Näherung ziehen wir die oben definierten Nachfrage-Szenarien hinzu. Abb. 18 bis Abb. 21 zeigen die Reichweite der bekannten Vorräte für die Szenarien mit niedrigem, mittlerem, hohem und ultimativem Bedarf. In allen Fällen wären die Beiträge aus Lagerbeständen, Wiederanreicherung von abgereichertem Uran und Strecken von HEU bis 2023 erschöpft; nur die Beiträge von MOX-Brennstoff und Wiederaufarbeitungsuran würden auf gleichbleibendem niedrigem Niveau weitergehen. Der Beitrag aus aktuellem Bergbau müsste daher also bis 2023 selbst im Szenario mit niedrigem Bedarf verdoppelt werden, um die Nachfrage decken zu können. Bei allen anderen Szenarien müsste die Produktion aus Bergwerken noch viel stärker ansteigen.

Es ist offensichtlich, dass die bekannten Uran-Vorräte die Nachfrage nur in dem Szenario mit niedrigem Bedarf decken könnten – das ist der Fall, der einen Ausstieg aus der Atomenergie

beinhaltet. Im Szenario mit mittlerem Bedarf wären die Vorräte schon 2048 erschöpft, zwei Jahre bevor das Szenario überhaupt endet. Im Szenario mit hohem Bedarf wären die Vorräte schon 2040 zu Ende und mit ultimativem Bedarf bereits 2026. Zu diesem Zeitpunkt wäre die in letzterem Fall angenommene Umstellung von fossil gefeuerten Kraftwerken auf Atomkraftwerke noch nicht einmal zur Hälfte durchgeführt.

Für eine dritte Annäherung ziehen wir auch Kapazitätsbeschränkungen heran. Abb. 18 stellt die erwarteten Kapazitäten den Bedarfs-Szenarien gegenüber. Man sieht, dass in Anbetracht der zu erwartenden Erschöpfung der sekundären Vorräte und der ziemlich gleichbleibenden Produktionskapazitäten die Kapazitäten, wenn überhaupt, dann nur knapp für den niedrigen Bedarfsfall ausreichen würden. In allen anderen Fällen müssten die Produktionskapazitäten massiv aufgestockt werden, bis zu vierfach im mittleren Bedarfsfall, sechsfach im hohen Bedarfsfall und 21-fach im ultimativen Bedarfsfall.

Abb. 18: Reichweite der Uran-Vorräte, Niedriger Bedarfsfall

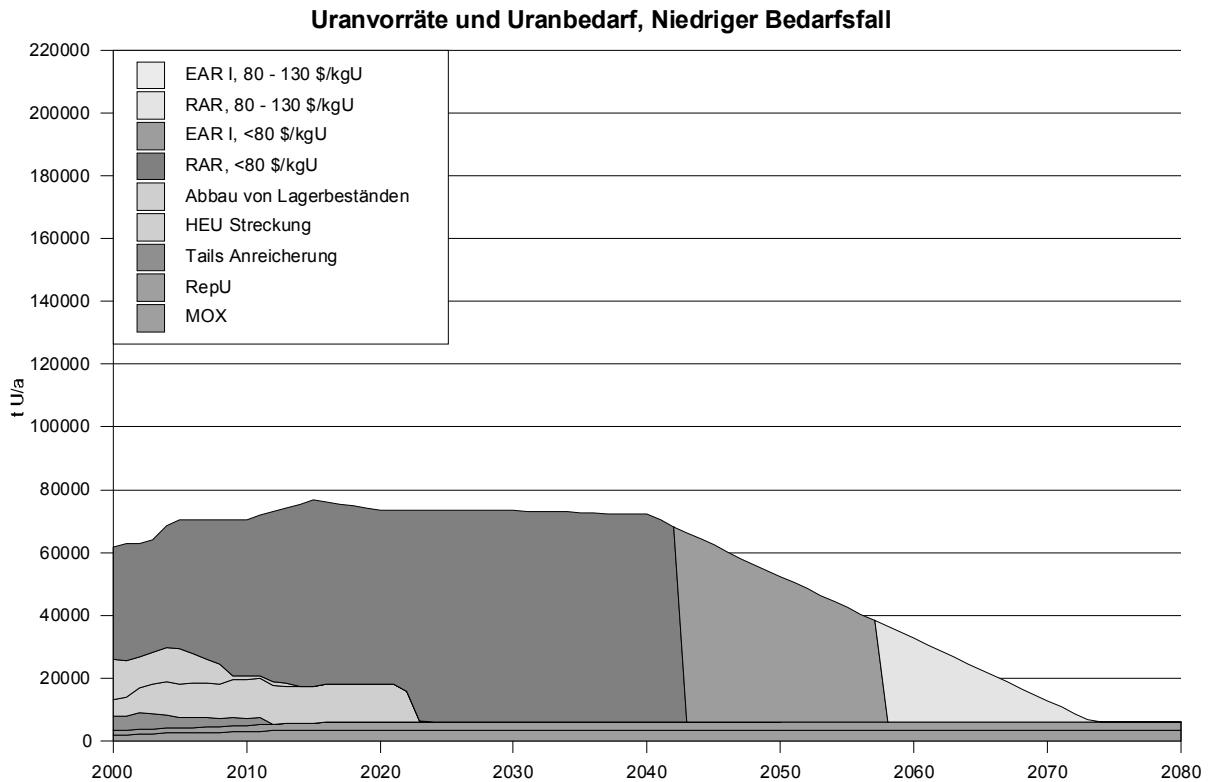


Abb. 19: Reichweite der Uran-Vorräte, Mittlerer Bedarfsfall

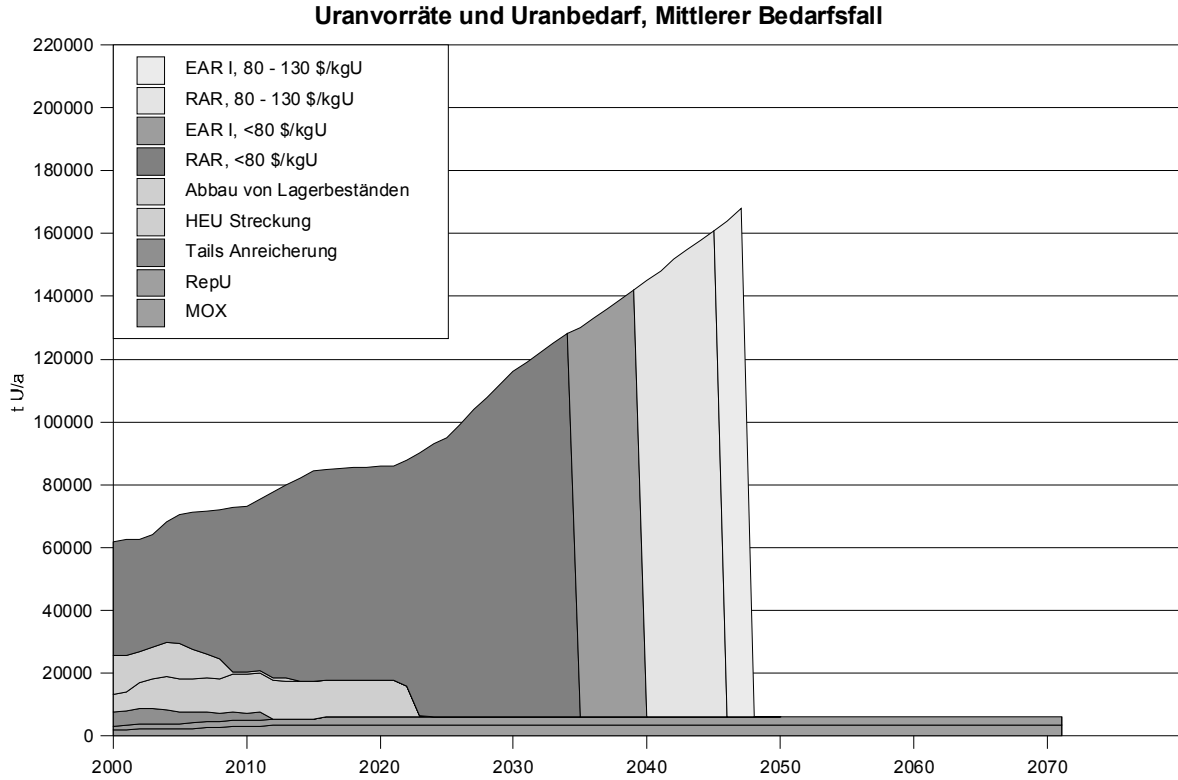


Abb. 20: Reichweite der Uran-Vorräte, Hoher Bedarfsfall

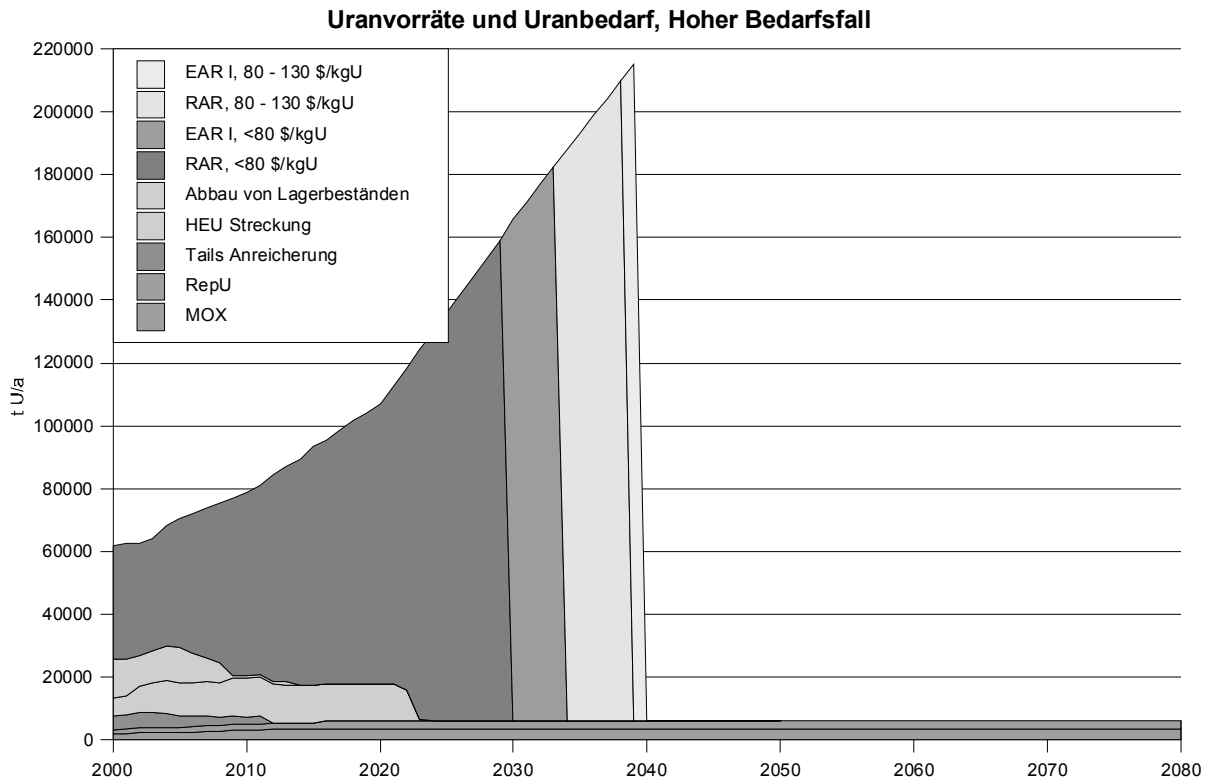


Abb. 21: Reichweite der Uran-Vorräte, Ultimativer Bedarfsfall

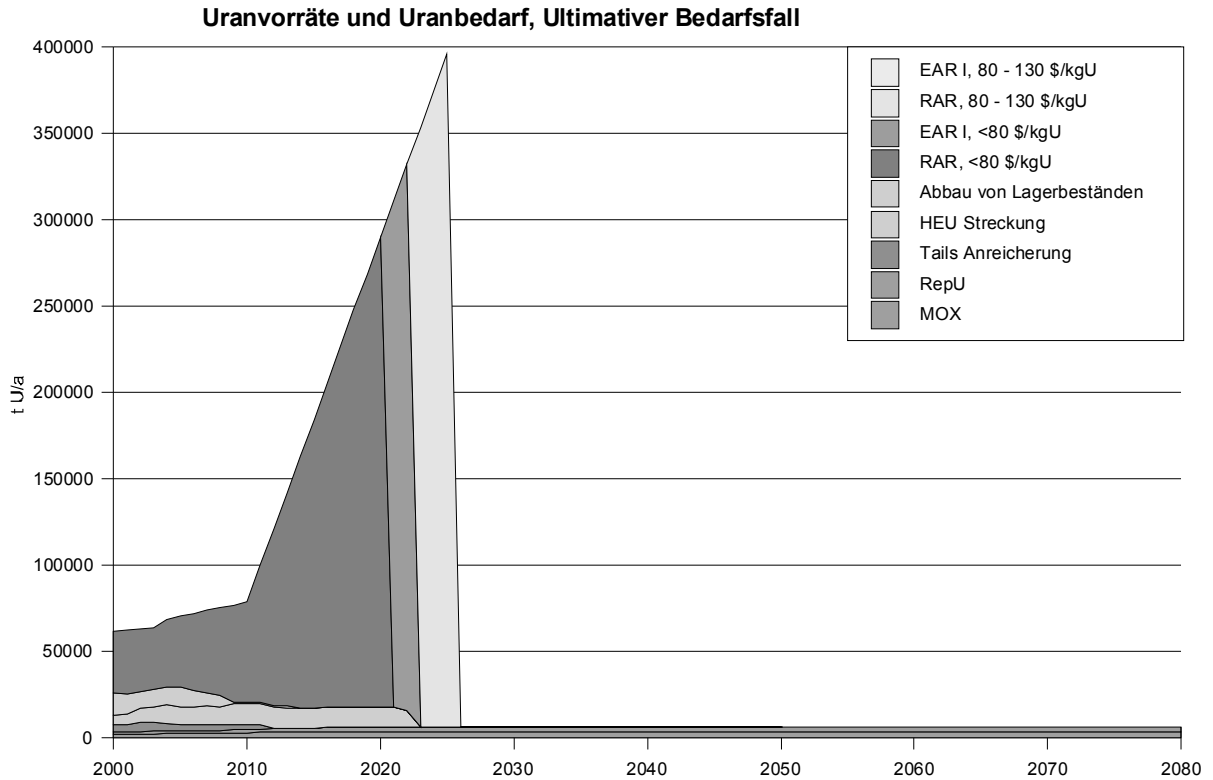
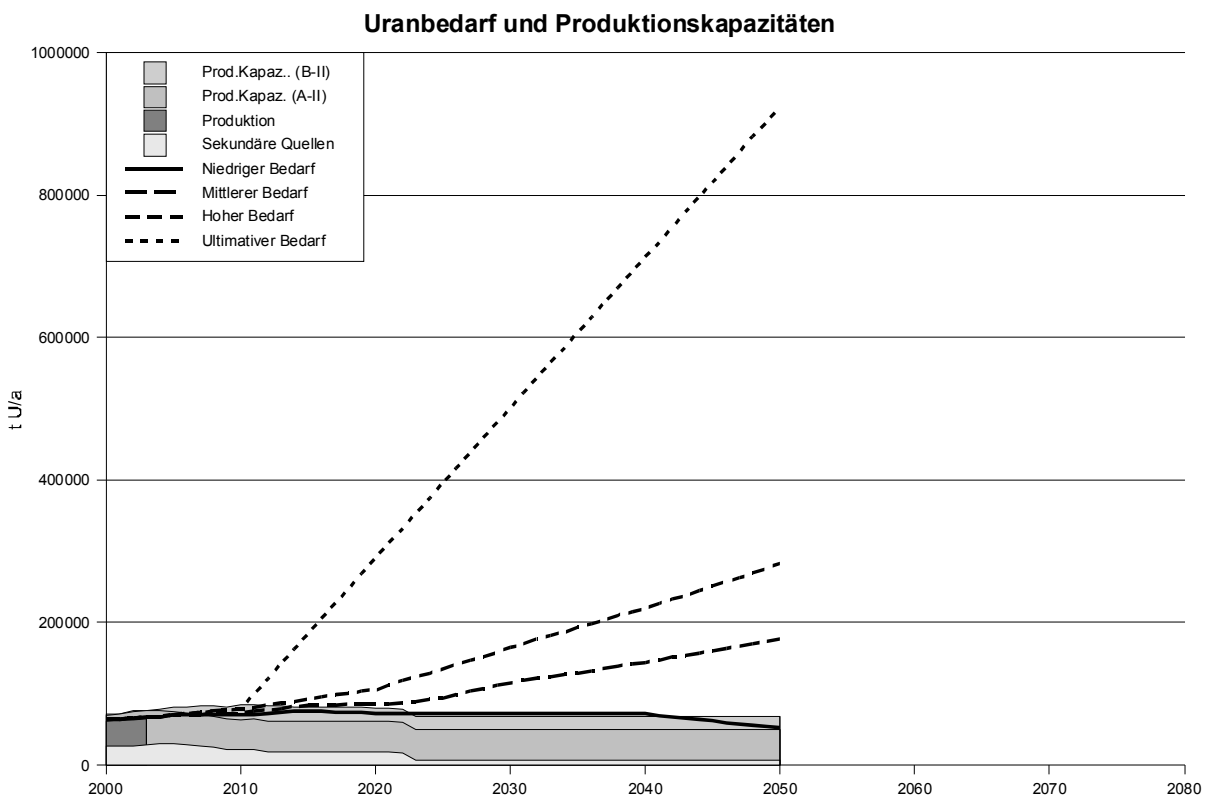


Abb. 22: Uran-Bedarf und Produktionskapazitäten



A-II: Produktionskapazität von bestehenden und beschlossenen Produktionszentren, getragen von Vorräten der Kategorien RAR und EAR-I

B-II: Produktionskapazität von bestehenden, beschlossenen, geplanten und angedachten Produktionszentren, getragen von Vorräten der Kategorien RAR und EAR-I

Tab. 30 erweitert die Kapazitätsbetrachtungen auf alle Anlagen, die für die Brennstoffherstellung benötigt werden, wenn auch nur für die derzeitigen Kapazitäten (siehe Tab. 30). Es wird auch die mit der Verwertung der sekundären Vorräte verbundene Nachfrage nach Kapazitäten berücksichtigt. Die Aufteilung der aktuellen Nachfrage auf die einzelnen sekundären Vorräte stellt mangels Daten aber nur eine grobe Schätzung dar. Weiterhin wurde die gesamte Brennstoffproduktion dem LWR-Brennstoff zugeschlagen, da eine Produktionsziffer für HWR-Brennstoff nicht ausfindig gemacht werden konnte.

Tab. 30: Kapazitätsauslastung bei den Schritten der Nuklearbrennstoff-Herstellung 2003

	Liefer. 2003 [t Unat equiv.]	In Anspruch genommene Kapazitäten									
		Abbau und Aufber. [t U als U ₃ O ₈]	Con- ver- sion [t U als U ₃ O ₈]	Anreicherung [Mio. SWU]				HEU Misch. [t U als HEU]	Brennelement-Fabrik		
				Zu- misch- komp.	Tails zu Unat	Unat zu LEU	Zwi.- summe		UOX [t U als UO ₂]	MOX [t HM]	HWR [t U als UO ₂]
MOX	2400	0	0	0	0	0	0	0	0,0	330,5	0
RepU	1500	0	1500	0	0	0,8	0,8	0	183,0	0	0
Wiederanr.	4850	0	0	0	3,2	2,7	5,9	0	591,7	0	0
HEU strecken	9300	0	0	6,5	0	0	6,5	28,2	1134,6	0	0
LEU Lagerb.	3653	0	3653	0	0	0	0	0	445,7	0	0
Unat Lagerb.	6494	0	0	0	0	3,6	3,6	0	792,3	0	0
Bergbauprod.	35772	35772	35772	0	0	20,0	20,0	0	4364,2	0	?
Gesamt	63969	35772	40925	6,5	3,2	27,2	36,9	28,2	7511,4	330,5	?
Kapazität		46000	69533				53,5	30,0	13819,0	460,0	3550
Auslastungs faktor		77,8%	58,9%				69,0%	93,9%	54,4%	71,8%	?
Skalierfaktor		1	1	7e-4	6,6e-4	5,6e-4		0,0030	0,122	0,1377	1

Abb. 23: Kapazitätsauslastung bei den Schritten der Nuklearbrennstoff-Herstellung 2003 [t Unat äquiv.]

Auslastung der Produktionskapazitäten 2003

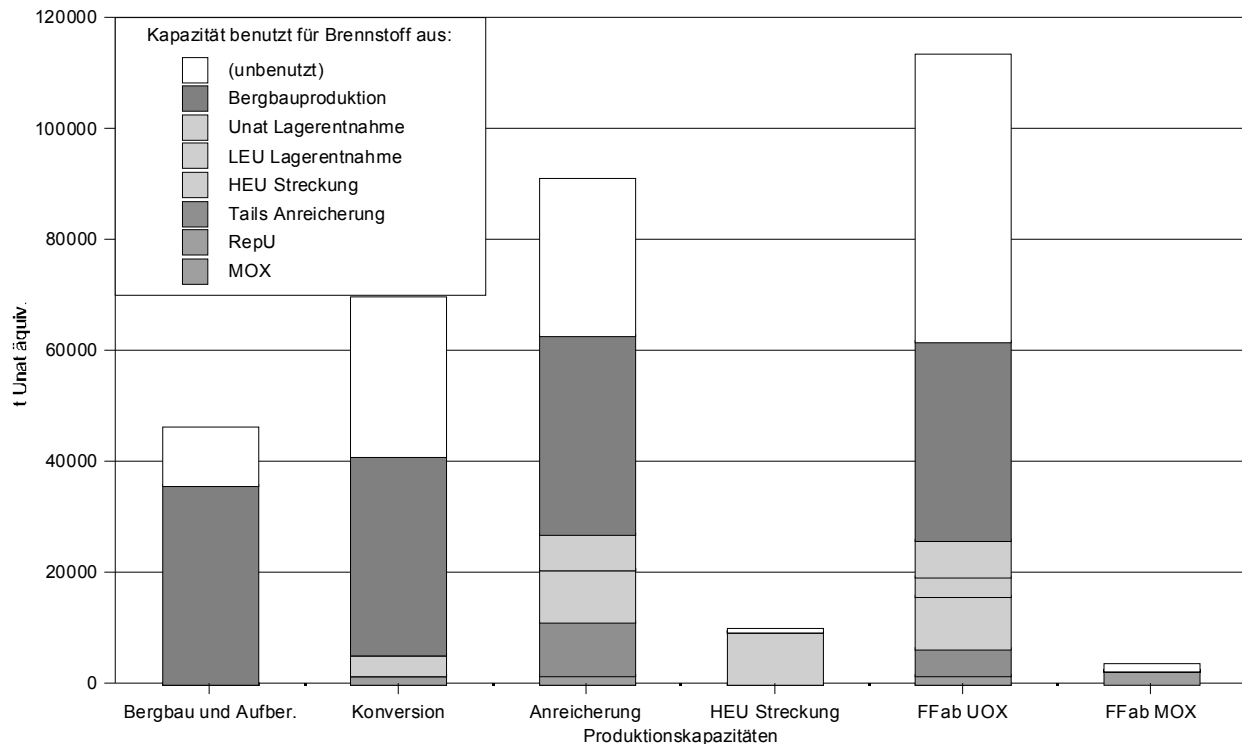
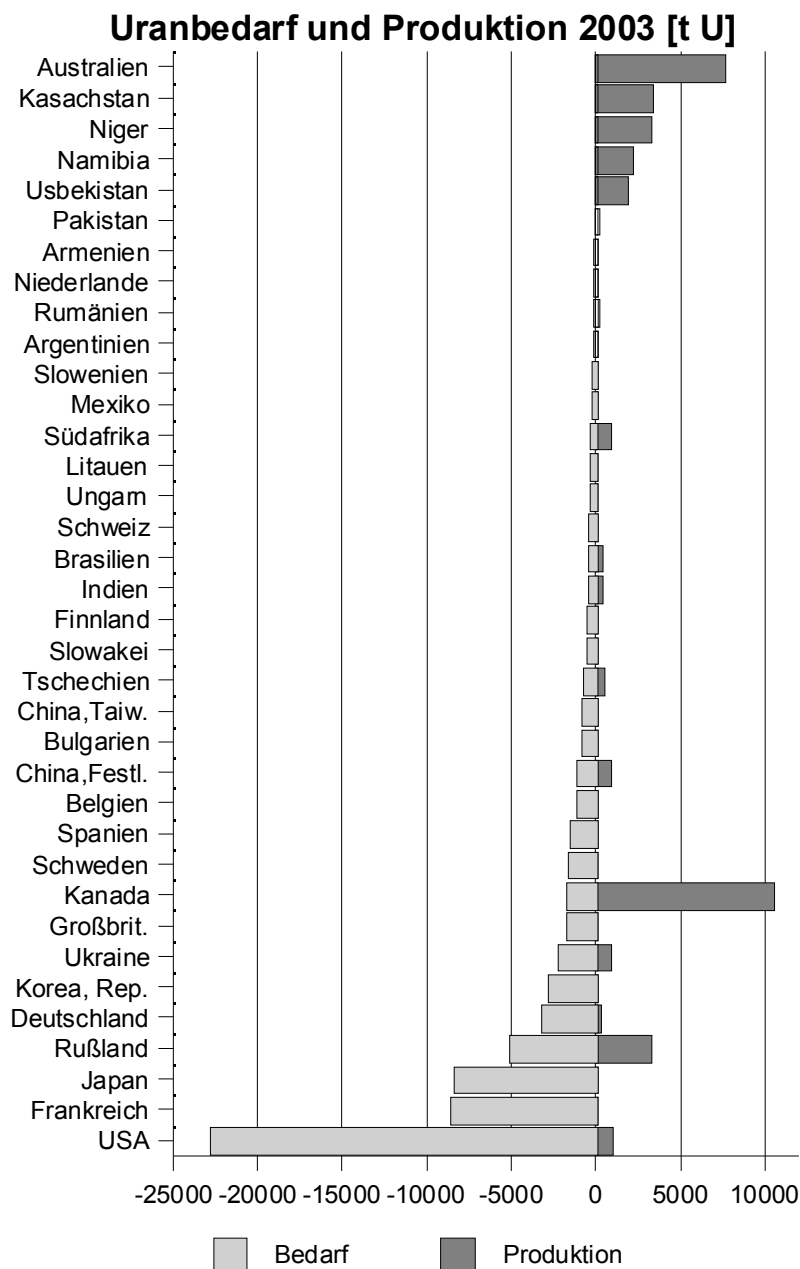


Abb. 23 zeigt das Ergebnis als Diagramm. Hier sind die Kapazitäten zur besseren Vergleichbarkeit in Tonnen Unat-Äquivalent angegeben. Es zeigt sich, dass die Kapazitätsreserven beim Uran-Bergbau und bei der Uranerz-Aufbereitung von allen Verarbeitungsschritten am geringsten sind. Wenn also die Nachfrage steigen sollte, dann müssten die Kapazitäten für Bergbau und Erzaufbereitung als erstes erweitert werden.

6. Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage

Abb. 24 zeigt Angebot und Nachfrage für Uran nach Ländern. Es ist zu sehen, dass kein Verbraucherland außer Kanada und Südafrika seinen Bedarf mit eigener Produktion decken kann.

Abb. 24: Uran-Bedarf für Atomkraftwerke und heimische Uran-Produktion, 2003, nach Ländern



Wenn man dazu noch Tab. 1, S. 7 heranzieht, wird außerdem deutlich, dass die meisten Großverbraucher-Länder außer den USA und Russland, wenn überhaupt, nur in geringem Umfang Uran-Lagerstätten besitzen. Nur sieben Länder produzieren derzeit mehr Uran als sie für ihren Eigenbedarf benötigen, sofern sie überhaupt einen haben (siehe auch Tab. 31).

Tab. 31: Länder, in denen 2003 die Uran-Produktion den heimischen Bedarf überstieg

Rang	Land	Produktionsüberschuß [t U]	von den Firmen
1.	Kanada	8.757	Cameco, Cogéma, ...
2.	Australien	7.572	WMC, ERA
3.	Kasachstan	3.300	Kazatomprom
4.	Niger	3.143	Cogéma
5.	Namibia	2.036	Rössing
6.	Usbekistan	1.770	Navoi
7.	Südafrika	478	Anglogold Ashanti

Im Folgenden wird die Situation in einigen Ländern etwas näher beleuchtet.

Russland

Die überraschende Tatsache, dass Russland mehr SWU für die Anreicherung von importiertem abgereicherten Uran zur Herstellung der Zumischkomponente für das Strecken von HEU aufwendet, als mit dem Einsatz des Mischprodukts dann wiedergewonnen werden kann (siehe Abb. 6, S. 17) zeigt, dass Russland massive Probleme bei der Beschaffung von Natururan hat. Unter Einsatz überschüssiger Anreicherungs Kapazitäten „erzeugt“ Russland aus importiertem abgereicherten Uran dringend benötigte sekundäre Uran-Quellen und vergibt dafür die Gelegenheit, die in dem HEU steckende Anreicherungsleistung zurückzugewinnen. Seit der Auflösung der Sowjetunion ist Russland von größeren Uran-Vorkommen abgeschnitten, die vorwiegend in Kasachstan liegen (siehe Tab. 1, S. 7). Kasachstan zieht es offenbar vor, sein Uran gegen harte Währung zu verkaufen. Bei der derzeitigen Produktion von 3.150 Tonnen pro Jahr (2003) werden Russlands Vorräte, die zu aktuellen Uran-Preisen abbaubar sind, in gerade einmal 15 Jahren erschöpft sein. Zudem übersteigt Russlands Uran-Bedarf für Atomkraftwerke von 5.100 Tonnen Uran (2003) die heimische Produktion um 1.950 Tonnen Uran, das sind 62%. Außerdem möchte Russland noch mehrere neue Atomkraftwerke bauen. Russland wird sich also, sofern es nicht noch größere Lagerbestände besitzt, in sehr naher Zukunft einer schweren Uran-Versorgungskrise gegenübersehen.

Ein anderer Grund für den Übergang zu Reaktoren mit einem geschlossenen Brennstoffkreislauf ist die Begrenztheit der heimischen Uran-Reserven, die nach Zrodnikov [Anatoly Z., Generaldirektor des Institute of Physics & Power Engineering (IPPE)] innerhalb von 10 Jahren zu einer schweren Versorgungskrise führen könnte.

Nach Angaben von russischen Geologen wird Russlands Bedarf an Natururan dieses Jahr 16.000 Tonnen betragen, während die heimische Produktion nur 3.200 Tonnen beträgt. Bis 2020 könnte der Bedarf bis auf 20.500 Tonnen ansteigen, bei einer erwarteten Produktion von dann 5.500 Tonnen.

Im Moment werden etwa 45% des Uran-Bedarfs des Landes aus Lagerbeständen gedeckt, die in zehn Jahren erschöpft sein werden, sagte Zrodnikov [NW April 21, 2005].

Im April 2005 besuchte eine russische Wirtschaftsdelegation den namibischen Premierminister. Anlässlich dieses Treffens fragte der russische Delegationsleiter launig in die Runde der anwesenden Medienvertreter: „Wir brauchen dringend Uran, habt ihr welches?“ Der Weltmarkt sei leer (Allgemeine Zeitung Windhoek, 21.4.2005).

Wird Russland große Uran-Bergwerke in Südjakutien errichten?

Funktionäre der Firma TVEL sagten, dass die Uran-Produktion in Russland „nach 2010 durch die Anlage neuer Uran-Bergwerke sichergestellt werden soll“. TVEL-Vizepräsident Golovinsky sagte, „neue große Uran-Bergbau-Unternehmen könnten auf der Grundlage einiger großer Lagerstätten in Südjakutien entstehen. Das erste Uran aus diesen Bergwerken könnte 2015 geliefert werden“, fügte er hinzu. Es sei aber klar, merkte Golovinsky an, dass diese Lagerstätten, die für 50 Jahre ausreichen würden, nicht ohne Unterstützung von Seiten der Regierung ausgebeutet werden könnten“ [Itar-Tass 25.3.2005].

Die fraglichen Lagerstätten liegen im Aldansky Uranerz-Bezirk. Die Erze liegen in Tiefen von mehr als 200-500 Meter, die produktivsten Zonen liegen überwiegend bei Tiefen von einem Kilometer und mehr. Der mittlere Uran-Gehalt ist 0,1 bis 0,15%. Außerdem enthält das Erz zwischen einem und einigen parts per million Gold. Diese Vorräte umfassen mehr als 200.000 Tonnen Uran in der Kostenkategorie 80 bis 130 US\$/kg Uran. Sie sind nicht in der offiziellen Statistik der Uran-Vorräte und damit auch nicht in Tab. 1 enthalten [IAEA 2001b], [IAEA 2004b].

Anscheinend sucht Russland nun doch nach anderen Auswegen: Im Januar 2006 gab Rosatom bekannt, dass man mit Kasachstan an einer Wiederherstellung der wirtschaftlichen Beziehungen im Atom-Sektor aus den Zeiten der Sowjetunion arbeite.

Die drohende russische Uran-Versorgungslücke ist auch von besonderem Interesse für die Stromversorger der EU, da „Russland 2003 insgesamt der größte Lieferant an EU-Stromversorger blieb, mit Lieferungen in der Größenordnung von 3.400 Tonnen Uran, plus 1.000 Tonnen Uran in der Form von wiederangereichertem Uran über Anreicherungsfirmen in der EU. [...] Zudem wurden etwas über 1.300 Tonnen Uran aus HEU an EU-Stromversorger geliefert“ [ESA AR 2003].

Russisches Material aus Unat, wiederangereichertem Uran, und gestrecktem HEU zusammen machte etwa 35% der Gesamtlieferungen an die Stromversorger in der EU von 16.400 Tonnen Uran im Jahre 2003 aus.

Der Bedarf der Atomkraftwerke der EU-Stromversorger betrug 2003 20.700 Tonnen Uran, der Rest von 4.300 Tonnen Uran kann dem Gebrauch von MOX (1.450 t U) und dem Abbau von Lagerbeständen (2.850 t U) zugerechnet werden. Dies bedeutet, dass 6.600 Tonnen Uran oder 32% des Bedarfs der EU-Stromversorger im Jahr 2003 aus sekundären Quellen gedeckt wurde.

Indien, China

Die potentiellen Großverbraucher Indien und China verfügen nur über sehr begrenzte Uran-Vorräte (siehe Tab. 1, S. 7). „Insbesondere können die bekannten Uran-Vorräte Indiens nicht einmal ein bescheidenes Atomenergieprogramm tragen, wenn dieser Brennstoff in einem offenen Kreislauf eingesetzt wird“ [IAEA 2004 S. 357].

7. Handelsbeschränkungen

a. Exportbeschränkungen

(zur Sicherstellung einer friedlichen Nutzung des Urans)

- **...zwingen Indien, marginale Lagerstätten abzubauen**

Als Nichtunterzeichner des Vertrages zur Nichtweiterverbreitung von Atomwaffen (NPT) hat Indien keinen Zugang zu ausländischem Uran, nachdem es 1974 einen Atomwaffentest durchgeführt hat. Indiens eigene Uran-Lagerstätten sind jedoch klein und haben nur niedrige Uran-Gehalte. In Ermangelung anderer Alternativen plant Indien derzeit dennoch, mehrere neue Bergwerke auf Armerzlagerstätten in verschiedenen Teilen des Landes zu errichten (siehe S. 39). Mittlerweile gibt es aber auch Anzeichen, dass Indien auf der Suche nach einer politischen Lösung für das Dilemma ist:

Indien sollte eine politische Lösung finden, um auf dem Weltmarkt Zugang zu neuester Reaktortechnologie und Uran zu erhalten, auch wenn es auf seiner bisherigen Position zum Atomwaffensperrvertrag (NPT) beharrt, sagte der scheidende Vorsitzende des Nuclear Fuel Complex (NFC), C. Ganguly, der zum Chef Nuclear Fuel Cycle (NFC) bei der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA in Wien ernannt wurde. Dr. Ganguly [...] hat auf die Notwendigkeit hingewiesen, eine politische Lösung auf dem Wege der Diplomatie zu finden, falls Indien sein Atomstromprogramm in großem Maßstab ausweiten wolle. „Lieber

Uran im Ausland kaufen, wenn man es dort billiger bekommt und nicht Zeit damit verschwenden, das Rad neu zu erfinden“ [The Hindu Aug. 13, 2004].

Als einen ersten Schritt hat Indien am 31. März 2005 die Convention on Nuclear Safety (CNS) ratifiziert, die Indiens Atomkraftwerke für Inspektionen durch ausländische Fachleute zugänglich macht.

- **...verhindern den Uran-Export von Australien nach China**

China möchte ein umfangreiches Atomkraft-Programm realisieren, verfügt aber nur über geringe eigene Uran-Vorräte. Australien wäre ein geeigneter Lieferant, aber die australischen Anforderungen zur Sicherstellung einer friedlichen Nutzung des Urans verhindern bisher solche Exporte. Im Februar 2005 begannen China und Australien jedoch erste Gespräche mit dem Ziel, solche Exporte im gegenseitigen Interesse zu ermöglichen.

- **...behindern die Wiederanreicherung von Uran in Russland**

Die Uran produzierenden Länder Australien und Kanada verlangen, dass abgereichertes Uran, das bei der Anreicherung oder Wiederanreicherung von Uran aus ihren Ländern anfällt, unter den Schutz der IAEA-Bestimmungen zur Sicherstellung einer friedlichen Nutzung fallen muss. Russland ist jedoch nicht gewillt, sich dieser Anforderung zu beugen. Urenco und Eurodif können daher kein abgereichertes Uran nach Russland zur Wiederanreicherung schicken, das bei der Anreicherung von kanadischem oder australischem Uran angefallen ist, wenn das in Russland anfallende abgereicherte Uran dort verbleibt. Verhandlungen in dieser Sache sind zwischen Russland, Australien, Kanada und Euratom im Gange [UI 2001].

Im Sommer 2003 wurde eine vorläufige Vereinbarung über abgereichertes Uran geschlossen, das aus der Anreicherung von kanadischem Uran stammt. Diese Vereinbarung ist „zeitlich begrenzt, bis die sich im Gange befindlichen politischen Konsultationen zu einem definitiven Ergebnis führen“ [ESA AR 2003].

Die offensichtliche Option, dass in Russland anfallende abgereicherte Uran wieder zurückzunehmen, wird offensichtlich nicht in Betracht gezogen, da dies die wirtschaftliche Basis für die Wiederanreicherung in Russland untergraben würde, nämlich die vermiedenen Entsorgungskosten für die westlichen Anreicherungsfirmen Eurodif und Urenco [Diehl 2004].

b. Importbeschränkungen

Beschränkungen für Uran-Importe wurden beispielsweise verhängt von den USA, um ihre heimische Uran-Industrie zu schützen oder von der EU, um nicht von einzelnen Lieferanten zu abhängig zu werden. Diese Beschränkungen begrenzen letztlich die russischen Uran-Exporte und verhindern, dass die überschüssigen russischen AnreicherungsKapazitäten für normale Anreicherungs-zwecke eingesetzt werden können.

Das US-Handelsministerium (DOC) unterhält ein kompliziertes System von Handelsbeschränkungen auf Importe von russischem Uran und Anreicherungs-Dienstleistungen. Das Ziel ist, die heimische Uran-Industrie zu schützen (siehe UI 1999a).

Die derzeitige Politik der Euratom Supply Agency (ESA) in Bezug auf den Import von Uran aus der Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) und von Anreicherungs-diensten aus Russland hat das Ziel, eine gewisse Vielfalt der Lieferanten sicherzustellen. Dies bedeutet, dass Stromversorger in der EU (d.h. die Uran-Verbraucher) im Mittel nicht zu mehr als etwa einem Viertel von Uran-Lieferanten aus der GUS abhängen sollten. Für russische Anreicherungs-dienste liegt die Grenze bei etwas weniger als einem Fünftel des jeweiligen Bedarfs. Die ESA-Politik will außerdem für „marktgerechte“ Preise sorgen [UI 2000].

In Anbetracht der drohenden Uran-Versorgungskrise Russlands ist zu erwarten, dass die Importbeschränkungen für Uran aus Russland schon bald ihre Bedeutung verlieren werden, da es keine russischen Uran-Exporte mehr geben wird.

Bei Anreicherungs-Dienstleistungen sieht die Sache dagegen anders aus: Während Russland sich mit einer massiven Knappheit bei den Uran-Vorräten konfrontiert sieht, hat es riesige überschüssige AnreicherungsKapazitäten, die noch aus den Zeiten des Kalten Krieges stammen (allein mehr als sieben Mio. SWU werden derzeit jährlich für die Wiederanreicherung von importiertem abgereichertem Uran verwendet, während weitere Kapazitäten für die Wiederanreicherung eigenen Materials benutzt werden). Die AnreicherungsKapazitäten in anderen Ländern werden konstant erweitert (wie in Urencos Anlagen in Großbritannien, den Niederlanden und Deutschland), und alte Diffusionsanlagen sollen durch Zentrifugentechnologie ersetzt werden (wie in Frankreich und den USA), aber Russland kann wegen Handelsbeschränkungen nicht einmal seine überschüssigen Zentrifugenkapazitäten auf dem Weltmarkt verkaufen. Russland benutzt die Überkapazitäten daher zur Wiederanreicherung von abgereichertem Uran, kann dafür aber vermutlich nicht den Marktpreis für SWU berechnen, sondern nur die Betriebskosten (siehe S. 18).

Weiterhin kann Russland nicht einmal sein wiederangereichertes Uran ohne Beschränkungen verkaufen. Die USA unterwerfen wiederangereichertes Material denselben Importbestimmungen wie russisches Material. Unter anderem unterliegt es damit dem US-Russia Suspension Agreement und dem USEC Privatization Act [UI 2001], [UI 1999a]. Die Euratom Supply Agency betrachtet wiederangereichertes Material, wenn es in der Form verkauft wird, in der es importiert wurde, als russisch und damit denselben Bedingungen unterworfen, die für den Uran-Import aus der GUS gelten. Wenn das Material in der EU jedoch weiter angereichert wird, dann unterliegt es nicht mehr diesen Beschränkungen und kann ohne weiteres an die Stromversorger in der EU verkauft werden. Diese Regelung lässt Russland also wenigstens ein kleines Schlupfloch [UI 2001], [UI 2000].

8. Uran-Preis

Der Uran-Preis hat im Lauf der Jahre beträchtliche Schwankungen infolge von Angebot und Nachfrage gezeigt, obwohl es in den frühen Jahren noch gar keinen freien Markt gab, da die US-Regierung der einzige Aufkäufer war. Ende der siebziger Jahre hatte der Uran-Preis wegen verstärkter Käufe der US-Regierung einen Höchststand von etwa 43 US\$/lb U_3O_8 erreicht. Er sank dann aber bald bis auf etwa zehn US\$/lb U_3O_8 ab, was nach und nach zur Stilllegung fast aller konventioneller Uran-Bergwerke in den USA führte. Nur der Lösungsbergbau ging auf niedrigem Niveau weiter. Mit dem Ende des Kalten Krieges im Jahre 1989 wurden umfangreiche sekundäre Uran-Quellen für den Markt verfügbar, und der Preis schwankte weiter um dieses Niveau, mit einer kleinen Spitze von 16,60 US\$/lb U_3O_8 Mitte 1996. Zu dieser Zeit schienen die sekundären Quellen zu Ende zu gehen, aber der Uran-Preis fiel wieder, bis er Ende 2000 einen Tiefststand von etwa sieben US\$/lb U_3O_8 erreichte. Seitdem begann er wieder zu steigen, erst ganz langsam und jetzt mit wachsendem Tempo. Mittlerweile hat er sich schon mehr als verfünffacht. Erste konventionelle Bergwerke in den USA sind nun nach jahrzehntelangem Stillstand wieder in Betrieb genommen worden, und die Exploration auf Uran zieht alle möglichen abenteuerlustigen Investoren an; die auf [WUP HP] geführte Liste von Uran-Bergbau- und Explorationsfirmen explodierte geradezu und hat nun über 360 Einträge. Der Preisanstieg hat sogar ein neues Geschäftsmodell hervorgebracht: In Erwartung eines weiteren Preisanstiegs wurde im März 2005 eine Firma namens Uranium Participation Corp. gegründet. Sie wird von der Uran-Bergbaufirma Denison Mines Inc. „gemanaged“, und ihr Geschäftszweck ist einzig und allein „in Uran-Konzentrat (U_3O_8) zu investieren, es zu lagern und zu verkaufen“.

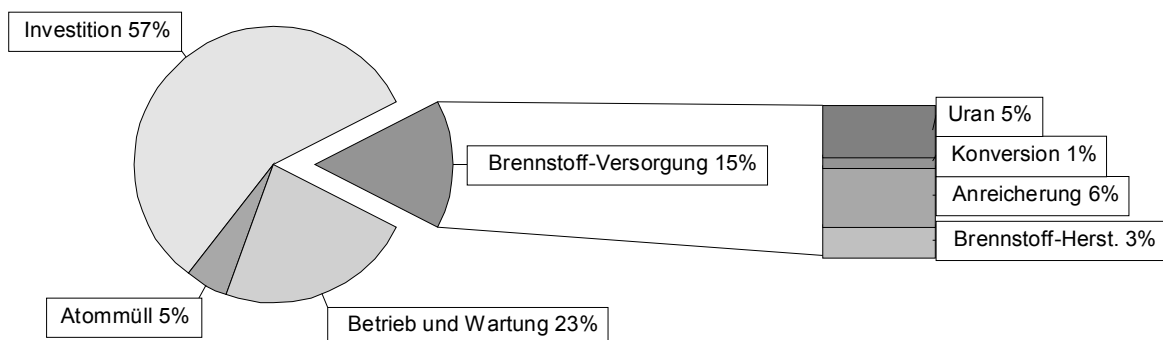
Das derzeitige Preisniveau liegt allerdings immer noch unter dem Ende der siebziger Jahre, wenn man die Inflation berücksichtigt. Weiterhin gibt der Spotpreis nicht unbedingt die tatsächlich gezahlten Preise wieder, da nur ein kleiner Teil des Urans auf dem Spotmarkt gehandelt wird. Der Spotpreis ist eher ein überempfindlicher Indikator für die kurzfristige Situation von Angebot und Nachfrage.

Während der Uran-Preis einen wichtigen Faktor darstellt, der die Uran-Erzeugung, die benutzten Abbaumethoden, die Einrichtung neuer Bergwerke, den Aufwand für Exploration und mehr beeinflusst, ist seine tatsächliche Auswirkung auf den Strompreis nur minimal. Abb. 25 zeigt eine typische Verteilung der Stromerzeugungskosten aus Atomenergie, hier aus [NEA 2001], obwohl die Kostenstrukturen von Land zu Land unterschiedlich sind. Die Bereitstellung des Brennstoffs macht 15% der Gesamtkosten aus. Ein Drittel der Bereitstellungskosten für den Brennstoff, oder fünf Prozent der Gesamtkosten entfällt auf Uran-Bergbau und Uranerz-Aufbereitung. Zugehörige Preise wären etwa Stromerzeugungskosten von 3 US¢/kWh und z.B. ein Uran-Preis in Höhe von etwa 50 US\$/kg Uran (19,23 US\$/lb U_3O_8), was zu einem Uran-Preisanteil von 0,15 US¢/kWh bei Atomstrom führen würde.

Wenn man annimmt, dass die Erzeugungskosten nur ein Drittel der gesamten Stromkosten ausmachen, würde der Uran-Preis nur 1,6% der tatsächlich von den Abnehmern bezahlten Stromkosten betragen. Wenn sich also der Uran-Preis verdoppelt, würden die Strompreise gerade einmal um 1,6% steigen. Wenn man weiter berücksichtigt, dass nur ein Teil der von einem Versorgungsunternehmen gelieferten Elektrizität aus Atomenergie stammt, würden die Auswirkungen auf den von den Abnehmern bezahlten Strompreis weiter abnehmen, je nach dem Energiemix des jeweiligen Versorgungsunternehmens.

Abb. 25: Zusammensetzung der Stromerzeugungskosten aus Atomenergie

Kostenstruktur von Strom aus Kernenergie



E. Schlussfolgerungen

- **Bekannte Uran-Vorräte können steigenden Bedarf nicht decken**

- Sekundäre Quellen, die derzeit fast die Hälfte des Uran-Bedarfs decken, haben nur einen Anteil von etwa fünf Prozent an den Gesamtvorräten und werden spätestens 2023 erschöpft sein.
- Die bekannten Uran-Vorräte reichen nur für ein Szenario mit niedrigem Bedarf aus, bei dem der Verbrauch bis 2040 im Wesentlichen konstant bleibt und dann abnimmt.
- Die bekannten Vorräte reichen nicht aus, um irgendeine nennenswerte Zunahme der Stromerzeugung aus Atomenergie abzudecken, geschweige denn den 15-fachen Anstieg der Atomkraft-Kapazitäten, der nötig wäre, um aus Klimaschutzgründen alle Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern zu ersetzen. Die Vorräte wären dann schon 2026 erschöpft.

- **Uran-Bergbau-Kapazitäten reichen nicht aus**

- Die Uran-Produktion aus Bergbau muss bis 2023 verdoppelt werden, allein schon um den derzeitigen Bedarf weiter zu decken, da die sekundären Quellen versiegen werden. Die bestehenden Kapazitäten können diesen Bedarf jedoch nicht decken, und nur an sehr wenigen Standorten sind die Vorarbeiten so weit, dass neue Kapazitäten eingerichtet werden können. Die Zeiten für die Inbetriebnahme neuer Bergwerke sind sehr lang.
- Jede Verbrauchssteigerung würde eine weitere massive Aufstockung der Abbaukapazitäten und – früher oder später – der folgenden Verarbeitungsschritte für die Brennstoff-Herstellung erfordern.

- **Zunahme der Umweltfolgen**

- Nur ein kleiner Teil aller Uran-Vorräte liegt in Reicherz-Lagerstätten. Daher muss der Abbau zunehmend auf Armerzen durchgeführt werden, was in der Regel weitreichende Umweltfolgen nach sich zieht.
-

- **Regionale Ungleichgewichte bei Angebot und Nachfrage**

- Die meisten derzeitigen und potentiellen größeren Abnehmerländer verfügen nur über sehr geringe eigene Uran-Vorräte und werden daher auf Uran-Importe angewiesen sein, während gerade einmal sieben Länder genug Uran produzieren, um überhaupt welches exportieren zu können.
- Ausgesprochen prekär ist die Situation von Russland, das sich innerhalb eines Jahrzehnts einer schweren Versorgungskrise gegenüber sieht. Diese Krise wird auch Auswirkungen für die EU haben, die derzeit stark abhängig ist von Uran-Lieferungen aus Russland.
- Die Versorgungsprobleme werden dramatisch zunehmen, wenn Indien und China tatsächlich auf eine Ausweitung der Atomenergie setzen – beide besitzen nur minimale Uran-Vorräte.
- Außerdem ist die Sicherstellung einer friedlichen Nutzung des Urans bei etwaigen Uran-Exporten nach Russland, Indien und China in Gefahr.

- **Steigende Kosten**

- Falls keine weiteren Reicherzlagerstätten gefunden werden, muss mit einem beträchtlichen Anstieg der Uran-Abbaukosten gerechnet werden.
- In Anbetracht der Erfahrungen mit früheren Uran-Bergwerken ist zu befürchten, dass der Abbau von Armerzlagerstätten neue Altlasten erzeugen wird, die dann mit

Steuergeldern saniert werden müssen, zu Kosten, die den Wert des abgebauten Urans erreichen können.

- **Vorgeschlagene Alternativen hochproblematisch**

- Der Abbau von Vorkommen mit sehr geringen Uran-Gehalten, wie z.B. Schwarzschiefer würde außerordentliche Kosten und Umweltfolgen verursachen, könnte aber auch nur eine zeitweise Entlastung bringen.
- Schnelle Brutreaktoren (wie für Russland und China vorgeschlagen) und Thorium-Reaktoren (wie für China und Indien vorgeschlagen) bringen unbeherrschbare neue Risiken mit sich und haben in der Praxis versagt. Die Thorium-Vorräte liegen zudem in noch niedriggradigeren Lagerstätten als die Uran-Vorräte, und sie sind genauso begrenzt wie diese.

F. Glossar

1. Begriffe und Abkürzungen

(ein * zeigt einen gesonderten Eintrag für einen Begriff an)

Abgereichertes Uran (depleted uranium - DU): Uran (in jeglicher chemischen Form), bei dem die Konzentration des Isotops U-235 niedriger ist als in *Natururan (< 0,711 Gewichts-%)

Angereichertes Uran: Uran (in jeglicher chemischen Form) bei dem die Konzentration des Isotops U-235 höher ist als bei *Natururan (> 0,711 Gewichts-%)

Anreicherung: Prozess zur Erhöhung der Konzentration des spaltbaren Isotops U-235 in Uran, gewöhnlich mit physikalischen Prozessen, wie Gasdiffusion oder Gaszentrifugierung; erzeugt einen Produktstrom mit *angereichertem Uran und einen Nebenproduktstrom mit *abgereichertem Uran (tails)

Assay: Konzentration eines Isotops (U-235, falls nichts anderes angegeben) in Uran, im Allgemeinen angegeben in Gewichts-%

DOE: U.S. Department of Energy

DU: depleted uranium = *abgereichertes Uran

EAR I: estimated additional resources – Category I

EPA: US Environment Protection Agency – amerikanische Umweltbehörde

ESA: Euratom Supply Agency

Feed: Uran, das als *UF₆ in eine Anreicherungsanlage eingespeist wird

HEU: highly-enriched-uranium, hoch-angereichertes Uran: Uran mit einer U-235-Konzentration von 20% oder mehr (nur in Atomwaffen oder Forschungsreaktoren benötigt)

HLW: high-level radioactive waste, hochaktiver radioaktiver Abfall

In-situ leaching (ISL): auch bekannt als Lösungsbergbau, Gewinnung von Uran aus einer wasserdurchlässigen unterirdischen Lagerstätte mittels chemischer Lösung (alkalisch oder sauer), ohne das Erz aus dem Untergrund zu holen

IAEA: International Atomic Energy Agency – Internationale Atomenergie Behörde, Wien

IEA: OECD International Energy Agency, Paris

ISL: *in-situ leaching

kg SWU: = *SWU

Konversion: Umwandlung von Uran aus einer chemischen Form in eine andere (*U₃O₈ zu *UF₆, falls nichts anderes angegeben)

LEU: lowly-enriched-uranium, niedrig-angereichertes Uran, Uran mit einem U-235-Gehalt von > 0,711% und < 20% (wie z.B. für den Gebrauch in Leichtwasserreaktoren - *LWR benötigt)

LLW: low-level radioactive waste, schwach aktiver Atommüll

Lösungsbergbau: *in-situ leaching

LWR: Leichtwasserreaktor, wie Siedewasserreaktor oder Druckwasserreaktor, benötigt als Brennstoff *angereichertes Uran mit einem U-235-Gehalt von 3-5%

Mischoxid-Brennstoff (MOX): Brennstoff für *LWR, bei dem ein Teil des U-235 durch Plutonium ersetzt ist

Mtoe: Mio. Tonnen Öl-Äquivalent (Energieeinheit)

Natururan: Uran (in jeglicher chemischen Form) mit natürlicher Isotopen-Zusammensetzung, enthält 0,711 Gewichts-% (entspricht 0,72 Atom-%) U-235

„naturäquivalentes“ Uran: hier benutzter Ausdruck für Uran mit natürlicher Konzentration an U-235, das durch *Wiederanreicherung von *abgereichertem Uran gewonnen wurde; die Konzentration des Isotops U-234 ist niedriger als bei echtem *Natururan; wird auch „pseudo-natürliches“ Uran genannt.

NEA: OECD Nuclear Energy Agency, Paris

NPT: Nuclear Non-Proliferation Treaty (Atomwaffensperrvertrag)

NRC: U.S. Nuclear Regulatory Commission

RAR: reasonably assured resources

RepU: *Wiederaufarbeitungsuran

Rosatom: Russische Atomenergiebehörde (vormals Minatom)

Sekundäre tails: *tails, die bei der *Wiederanreicherung anfallen

Strecken (downblending) von HEU: Mischung von *HEU mit einer *Zumischkomponente, um *LEU für Kernbrennstoff zu erhalten

SWU: separative work unit, Einheit für die *Anreicherungs-Arbeit, auch bezeichnet als “kg SWU”

t SWU: 1000 *SWU

t U: Tonnen Uran, die in einer Verbindung enthalten sind

tailings: *Uranerz-Aufbereitungsrückstände; nicht zu verwechseln mit *tails

tails: Nebenprodukt der *Anreicherung von Uran: *abgereichertes Uran in der Form von *UF₆; nicht zu verwechseln mit *tailings

tails upgrading: *Wiederanreicherung von *tails

TWh: Terawattstunde (Energieeinheit), 1 TWh = 10¹² Wh = 10⁹ kWh = 1 Mrd. kWh

Uranhexafluorid (UF₆): chemische Form von Uran, wie sie für die Anreicherung benötigt wird; bei Umgebungstemperatur ein kristalliner Feststoff, der oberhalb von 56°C verdampft

Uranerz-Aufbereitungsrückstände (tailings): sand- bzw. schlammförmiger Abfall aus der Gewinnung von Uran aus Erz, enthält noch 85% der im Erz ursprünglich vorhandenen Radioaktivität

Uran-Konzentrat (UOC): verkaufsfähiges Endprodukt der Uran-Gewinnung aus Erzen, enthält mindestens 90% U₃O₈; besteht aus Uran-Verbindungen wie Ammoniumdiuranat, oder Natriumdiuranat, enthält noch Verunreinigungen; bekannt als "Yellow Cake", obwohl nicht alle Verbindungen von gelber Farbe sind

Udep: *abgereichertes Uran

Uenr: *angereichertes Uran

Unat: *Natururan

Uneq: *, „naturäquivalentes“ Uran

Urep: *Wiederaufarbeitungsuran

UF₆: *Uranhexafluorid

UO₂: Chemische Form von Uran, wie sie in Brennstäben für *LWR benötigt wird

U₃O₈: Chemische Form von Uran, wie sie bei der Gewinnung aus Erz anfällt (siehe *Uran-Konzentrat)

UOC: *Uran-Konzentrat

USEC: U.S. Enrichment Corporation

Wiederanreicherung (re-enrichment, tails upgrading): Verwendung von *abgereichertem Uran statt *Natururan zum Einspeisen in die Anreicherungsanlage; nicht zu verwechseln mit dem *Recycling* von Uran aus abgebrannten Brennelementen (*Wiederaufarbeitungsuran).

Wiederaufarbeitungsuran (RepU, Urep): Uran, das durch Wiederaufarbeitung aus abgebrannten Brennelementen zurückgewonnen wurde, kann in neuen Brennstoff recycelt werden, enthält unerwünschte Beimengungen des Isotops U-236 (ein Neutronenabsorber)

Yellow cake: *Uran-Konzentrat

Zumischkomponente (blendstock): Uran (*LEU, *Unat, oder *DU), das für das *Strecken von *HEU benutzt wird

2. Umrechnungsfaktoren

Tab. 32: Uran-Gehalte

1 lb U ₃ O ₈ = 0,385 kg U	1 kg U = 2,6 lbs U ₃ O ₈
1 Mio. lbs U ₃ O ₈ = 385 t U	1 t U = 2600 lbs U ₃ O ₈
1 short ton U ₃ O ₈ = 0,77 t U	1 t U = 1,3 short tons U ₃ O ₈
1 t U ₃ O ₈ = 0,848 t U	1 t U = 1,179 t U ₃ O ₈
1 t UF ₆ = 0,676 t U	1 t U = 1,479 t UF ₆
1 t UO ₂ = 0,8815 t U	1 t U = 1,134 t UO ₂

Tab. 33: Masse

1 Feinunze = 31,1034768 g	1 kg = 32,1507466 Feinunze
1 oz = 28,34953 g	1 kg = 35,27395 oz
1 lb = 0,45359 kg	1 kg = 2,2046 lbs
1 short ton = 0,907185 t	1 t = 1,1023 short tons

Tab. 34: Energie

	TJ	Gcal	Mtoe	MBtu	GWh
1 TJ =	1	238,8	$2,388 \times 10^{-5}$	947,8	0,2778
1 Gcal =	$4,1868 \times 10^{-3}$	1	10^{-7}	3,968	$1,163 \times 10^{-3}$
1 Mtoe =	$4,1868 \times 10^4$	10^7	1	$3,968 \times 10^7$	11630
1 MBtu =	$1,0551 \times 10^{-3}$	0,252	$2,52 \times 10^{-8}$	1	$2,931 \times 10^{-4}$
1 GWh =	3,6	860	$8,6 \times 10^{-5}$	3412	1

Tab. 35: Dezimale Vervielfacher

k	M	G	T	P	E
Kilo	Mega	Giga	Tera	Peta	Exa
10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}

G. Literatur

[ASNO AR 2004] Annual Report 2003-2004, Australian Safeguards and Non-Proliferation Office, 2004

<http://www.asno.dfat.gov.au/>

[atw] atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Bonn

[Bukharin 2004] Russia's Gaseous Centrifuge Technology and Uranium Enrichment Complex, by Oleg Bukharin, Program on Science and Global Security, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, January 2004

<http://www.ransac.org/Documents/bukharinrussianenrichmentcomplexjan2004.pdf>

[CISAC 2005] Preventing Nuclear Proliferation and Nuclear Terrorism: Essential steps to reduce the availability of nuclear-explosive materials; Center for International Security and Cooperation, Stanford Institute for International Studies, Stanford University, and Program on Science and Global Security, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, March 2005

<http://cisac.stanford.edu/publications/20855/>

[Combs 2004] Fuelling the Future of Nuclear Power: A New Paradigm, by J. Combs, World Nuclear Association Annual Symposium 2004

<http://www.world-nuclear.org/sym/2004/pdf/combs.pdf>

[Connor 2003] Teetering on the Brink?, by Michael J. Connor, World Nuclear Association Annual Symposium 2003

<http://www.world-nuclear.org/sym/2003/pdf/connor.pdf>

[Cour des Comptes 2005] Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs, Rapport au Président de la République suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés, Cour des Comptes, Paris, Janvier 2005

<http://www.ccomptes.fr/Cour-des-comptes/publications/rapports/nucleaire/introduction.htm>

[Del Frari 2001] The Global Nuclear Fuel Market Supply and Demand 2001-2020, by Bernard Del Frari, World Nuclear Association 2001 Symposium

<http://www.world-nuclear.org/sym/2001/pdfs/delfrari.pdf>

[Diehl 2004] Re-enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia, by Peter Diehl, Nov. 2004

<http://www.wise-uranium.org/pdf/reenru.pdf>

[DOE EIA 1997] Nuclear Power Generation and Fuel Cycle Report 1997, U.S. DOE Energy Information Administration, DOE/EIA-0436(97), September 1997

http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/n_pwr_fc/npgfcr97.pdf

[DOE EIA 1998] Commercial Nuclear Fuel from U.S. and Russian Surplus Defense Inventories: Materials, Policies, and Market Effects, U.S. DOE Energy Information Administration, DOE/EIA-0619, May 1998

http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/com_fuel/com_fuel.pdf

[DOE EIA 2001] Nuclear and Uranium Forecasts

<http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/page/forecast/foresum.html>

- [DOE EIA 2004] Uranium Marketing Annual Report , US DOE EIA, April 29, 2005
<http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/umar/umar.html>
- [DOE EIA 2005] Domestic Uranium Production Report , US DOE EIA, March 29, 2005
<http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/dupr/dupr.html>
- [DOE 1996] DOE Sale of Surplus Natural and Low Enriched Uranium, Environmental Assessment DOE/EA-1172, October 1996, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, U.S. Department of Energy, Washington, DC, 97 p.
<http://www.ne.doe.gov/pdf/finalea.pdf>
- [ESA AR 1996 - 2003]: Euratom Supply Agency: Annual Reports 1996 - 2003
<http://europa.eu.int/comm/euratom/>
- [Graul 2003] The Global Nuclear Fuel Market, Supply and Demand 2003-2025, by Heinrich Graul, World Nuclear Association Annual Symposium 2003
<http://www.world-nuclear.org/sym/2003/pdf/graul.pdf>
- [HSE 2004] Urenco (Capenhurst) Ltd's strategy for decommissioning its nuclear licensed site, A review by HM Nuclear Installations Inspectorate, The Health and Safety Executive, Bootle, Merseyside, UK, November 2004
<http://www.hse.gov.uk/nsd/uclqqr.pdf>
- [IAEA 1986] Long Term Uranium Supply-demand Analyses, IAEA-TECDOC-395, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1986.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_395_web.pdf
- [IAEA 1993] Impact of Extended Burnup on the Nuclear Fuel Cycle, IAEA-TECDOC-699, International Atomic Energy Agency, Vienna, April 1993, 115 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_699_web.pdf
- [IAEA 1997a] Changes and Events in Uranium Deposit Development, Exploration, Resources, Production and the World Supply-Demand Relationship, IAEA-TECDOC-961, International Atomic Energy Agency, Vienna, September 1997, 332 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_961_prn.pdf
- [IAEA 1997b] Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategies: Adjusting to New Realities Contributed Papers, IAEA-TECDOC-990, International Atomic Energy Agency, Vienna, December 1997, 306 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_990_prn.pdf
- [IAEA 1998] Critical Review of Uranium Resources and Production Capability to 2020, IAEA-TECDOC-1033, International Atomic Energy Agency, Vienna, August 1998, 40 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1033_prn.pdf
- [IAEA 2001a] Analysis of Uranium Supply to 2050, International Atomic Energy Agency, STI/PUB/1104, ISBN 92-0-100401-X, Vienna, May 2001, 103 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1104_scr.pdf
- [IAEA 2001b] Assessment of Uranium Deposit Types and Resources - A Worldwide Perspective, IAEA-TECDOC-1258, International Atomic Energy Agency, Vienna, December 2001, 260 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1258_prn.pdf

[IAEA 2002] The Uranium Production Cycle And the Environment, International Atomic Energy Agency, IAEA-CSP-10/P, Vienna, April 2002, 573 p.

<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CSPS-10-P.pdf>

[IAEA 2004a] Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power C&S Papers Series No. 24, International Atomic Energy Agency, IAEA-CSP-24/P, Vienna, September 2004, 784 pp.

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CSPS-24-P/CSP-24_attention.pdf

[IAEA 2004b] Recent Developments in Uranium Resources and Production with Emphasis on In Situ Leach Mining, IAEA-TECDOC-1396, International Atomic Energy Agency, Vienna, September 2004, 332 p.

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1396_web.pdf

[IAEA 2005] Developments in Uranium Resources, Production, Demand and the Environment, Proceedings of a technical committee meeting held in Vienna, 15–18 June 1999, IAEA TECDOC Series No. 1425, International Atomic Energy Agency, Vienna, January 2005, 193 pp.

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1425_web.pdf

[IEA 2002] World Energy Outlook 2002, OECD International Energy Agency, Paris, November 2002, 533 pp.

<http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2000/weo2002.pdf>

[IEA HP] OECD International Energy Agency homepage

<http://www.iea.org/>

[NEA 1994] The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD Nuclear Energy Agency, 1994

<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/efc/>

[NEA 2001] Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects, OECD Nuclear Energy Agency, ISBN 92-64-19664-1, Paris, December 2001, 164 pp.

<http://www.nea.fr/>

[NEA 2004] Uranium 2003: Resources, Production and Demand, OECD Nuclear Energy Agency / International Atomic Energy Agency, Paris 2004, 293 pp.

<http://www.nea.fr/>

[NEA 2005] Projected Costs of Generating Electricity – 2005 Update, OECD Nuclear Energy Agency, Paris 2005, 234 pp.

<http://www.nea.fr/>

[NF] *Nuclear Fuel*, New York

[NRCAN 2004] Mineral and Commodity Review, Uranium 2003, Natural Resources of Canada, 2004

http://www.nrcan.gc.ca/mms/cmy/com_e.html

(NW) Nucleonics Week, New York

[Pauluis 1998] The global nuclear fuel market to 2020, by Gérard Pauluis, Uranium Institute 1998 Symposium

<http://www.world-nuclear.org/sym/1998/pdfs/paul.pdf>

[Pavlov 1997] The nuclear fuel market in Russia and the former Soviet Union: the dreams and the reality, by Alexander Pavlov, Uranium Institute 1997 Symposium

<http://www.world-nuclear.org/sym/1997/pdfs/pavl.pdf>

[PCAST 1999] Powerful Partnerships: The Federal Role In International Cooperation On Energy Innovation. A Report From The President's Committee Of Advisors On Science And Technology Panel On International Cooperation In Energy Research, Development, Demonstration, And Deployment. Washington, DC, June 1999

[Pool 1997] Primary and Secondary Uranium Supplies: Different Cost Structures, Different Goals, by Thomas C. Pool, Uranium Institute 1997 Symposium

<http://www.world-nuclear.org/sym/1997/pdfs/pool.pdf>

[Szymanski 1997] The Effects of US and Russian Government Surplus Inventories, by William N. Szymanski, Uranium Institute 1997 Symposium

<http://www.world-nuclear.org/sym/1997/pdfs/szym.pdf>

[UI 1999a] Uranium Imports to the USA from CIS Countries, UI Trade Briefing, Issue 1, August 1999

http://www.world-nuclear.org/trade_issues/

[UI 1999b] The US-Russia HEU Agreement, UI Trade Briefing, Issue 1, August 1999

http://www.world-nuclear.org/trade_issues/

[UI 2000] EU Policy on Imports of Uranium and Enrichment Services, UI Trade Briefing, Issue 1, February 2000

http://www.world-nuclear.org/trade_issues/

[UI 2001] Trade Aspects of the Re-enrichment of Uranium Tails, UI Trade Briefing Issue 1, January 2001

http://www.world-nuclear.org/trade_issues/

[WMC HP] WMC homepage

<http://www.wmc.com/>

[WNA HP] World Nuclear Association homepage

<http://www.world-nuclear.org/>

[WUP HP] WISE Uranium Project homepage

<http://www.wise-uranium.org>