

# Perspektiven nuklearer Energieerzeugung bezüglich ihrer Uran Brennstoffversorgung

Nikolaus ARNOLD<sup>(1)</sup>, Wolfgang KROMP<sup>(1)</sup>, Werner ZITTEL<sup>(2)</sup>

(1) Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften, Universität für Bodenkultur, Borkowskigasse 4, 1190 Wien, +43 1 47654 7710, risk@boku.ac.at, www.risk.boku.ac.at

(2) Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Daimlerstrasse 15, 85521 München-Ottobrunn, Deutschland, +49 89 608 1100, info@lbst.de, www.lbst.de

## Kurzfassung:

Im Rahmen der Suche nach einer Umstrukturierung der Energieversorgung und den Bemühungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen findet auch die Kernenergie in den letzten Jahren immer mehr Fürsprecher. Wesentlich für den Betrieb von aktuellen Kraftwerkstypen ist spaltbares Uran-235 und daher ist die Verfügbarkeit dieses Spaltstoffes die Basis für die Ausbaufähigkeit und die Reichweite dieser Technologie.

Weltweit gelten derzeit rund 4,4 Mio. Tonnen Natururan als relativ gesicherte und unter 260\$/kg förderbare Uranressourcen (RAR). Diese Vorkommen sind auf wenige Länder verteilt. Insbesondere ist das meiste Uran auf wenige große Lagerstätten konzentriert, für die nur ein begrenztes Fördervolumen erwartet werden kann. Daraus ergibt sich, dass die Reichweite, selbst bei gleichbleibendem Reaktorpark, geringer ist als es die verfügbaren Reserven geteilt durch den derzeitigen Bedarf (70 000 tU p.a.) nahelegen.

Für diese Publikation wurden Datenerhebungen und Untersuchungen durchgeführt, um die langfristigen Versorgungsmöglichkeiten von Kernreaktoren mit Uran-235 zu erheben. Dazu wurden Produktionsdaten und Ressourcen verschiedener Uranproduktionsstätten sowie gesamter Staaten erhoben. Durch die Aufsummierung der einzelnen Datensätze entstehen globale Produktionsszenarien für verschiedene Ressourcenkategorien, die dann mit Bedarfsprognosen verglichen werden können. Wesentliche Ergebnisse dieser Studie waren:

- Ein Ausbau der Kernenergie entsprechend des prognostizierten Bedarfs scheint auf Basis der derzeit bekannten RAR nicht möglich.
- Das Erreichen einer ausgeglichenen Produktions-Bedarfs-Bilanz auf derzeitigem Bedarfsniveau ist für mehrere Jahrzehnte möglich, wodurch der Bedarf an sekundären Ressourcen (max. 600 000tU verfügbar) verringert werden könnte.
- Betrachtet man die unsicheren Ressourcenkategorien so lassen sich leichte und mittlere Wachstumsszenarien für etwa eine Reaktorgeneration versorgen. Ein Ausbau der Kernenergie zu „high demand“ Szenarien (Verdoppelung des Reaktorparks und mehr) scheint selbst inklusive spekulativer Ressourcen auf Basis von Uran-235 nicht nachhaltig realisierbar.

**Keywords:** Uran, Brennstoffversorgung, Ressourcenanalyse, Versorgungsszenarien

1	Einleitung und Fragestellung.....	3
2	Methodik.....	3
3	Ressourcenanalyse.....	5
3.1	Reserven und Ressourcen .....	6
3.1.1	Definitionen.....	6
3.2	Konventionelle Ressourcen.....	7
3.2.1	Reasonably Assured Resources (RAR) .....	7
3.2.2	Identified Resources .....	8
3.3	Konzentrationen .....	9
3.4	Unkonventionelle und Sekundäre Ressourcen.....	10
3.4.1	Unkonventionelle Ressourcen .....	10
3.4.2	Sekundäre Ressourcen .....	11
4	Produktion und Bedarf .....	11
4.1.1	Key Countries .....	12
4.1.2	Vorlaufzeit zur Erschließung neuer Lagerstätten.....	13
5	Ausblick.....	14
6	Schlussfolgerungen.....	17
	Literatur .....	18
	Glossar .....	18

## 1 Einleitung und Fragestellung

Die Kernenergie beansprucht heute für sich, eine wesentliche Rolle sowohl bei der Bekämpfung des Klimawandels durch Verminderung von Treibhausgasemissionen als auch zur der Kompensation der Verknappung fossiler Energieträger zu spielen. Um diesen Ansprüchen gerecht werden zu können, erweist sich die Verfügbarkeit von spaltbarem Uran-235 als wesentlicher Punkt. Zwar wird schon seit vielen Jahren an alternativen Brennstoffkreisläufen und sogenannten Reaktoren der 4. Generation geforscht, aber bisherige Ergebnisse lassen keine nennenswerten Fortschritte erkennen. Dadurch stellt der Uranabbau eine wesentliche Basis der Kernenergie dar, da die Verwendung von wieder aufbereitetem Uran (RepU) und MOX technisch aufwendiger und problematisch ist und daher nur in geringem Maße genutzt wird.

Der Fokus wird seit dem unerwarteten Preisanstieg im Jahr 2007 wieder stärker auf die Ausweitung der Förderung gelegt. Insbesondere da die Erschließung neuer Lagerstätten lange Vorlaufzeiten benötigt, liegt hierin ein großes finanzielles Risiko potenzieller Betreiber.

Es ist das Ziel dieser Publikation, Ressourcenerhebungen und Verfügbarkeitszenarien für Uran zu erstellen und diese in Relation zum Bedarf zu setzen.

## 2 Methodik

### Datenbasis

Basis für eine Abschätzung der weltweit verfügbaren Uranressourcen ist eine umfassende Sammlung der dazu vorliegenden Daten.

Als Grundstock wurden Daten zu existierenden und geplanten Produktionsstätten aus den Geschäftsberichten verschiedener Firmen, die in der Uranwirtschaft tätig sind, herangezogen. Anschließend wurden diese mit Daten aus anderen Quellen (IAEA, WNA, WISE, ...) ergänzt und verglichen, um ein möglichst vollständiges Bild der globalen Ressourcenverfügbarkeit und -verteilung zu erhalten.

So konnten Daten zu den folgenden Kenngrößen erfasst werden:

- Mengen an Ressourcen
- Klassifizierung von Ressourcen
- Qualität des Erzes
- Kapazitäten der Produktionsstätten
- Historische Produktionsdaten
- Historische Auslastung von Produktionsstätten
- Geplante Erschließungen und Erweiterungen

Darüber hinaus ließen sich im Rahmen der Datensammlung auch Engpässe im Ausbau von Kapazitäten, Verzögerung bei den Inbetriebnahmen und ähnliches bestimmen.

Auf Basis der gesammelten Daten können sowohl einzelne Minen als auch Länderprofile betrachtet werden, um dann ein globales Bild zu Status und Zukunft der Uranversorgung zu erstellen. Eine genaue Betrachtung beschränkt sich jedoch auf jene Produktionsstätten, die

bereits in Betrieb sind bzw. zu denen Details der Planung ermittelt werden konnten. Andere Pläne und Projekte wurden den gesamten unbestimmten Länderressourcen zugeordnet, wie sie beispielsweise von der IAEO ermittelt werden.

Bei der Bearbeitung der Daten zeigt sich, dass einerseits die Abschätzungen der Firmen nur auf wenige Jahre ausgelegt sind, um einen „miningplan“ zu erfüllen, andererseits der administrative, logistische und technische Vorlauf zur Erschließung neuer Minen mit 10 oder mehr Jahren lange ist. Insbesondere durch die Ausmittelung zu optimistischer Planungen mit nicht erfassten Projekten sollte sich für eine Hochrechnung eine hinreichende Genauigkeit und Prognostizierbarkeit ergeben.

### Versorgungsausblick

Die gesammelten Daten zu Reserven und Ressourcen sowie zu den Kapazitäten der Minen und deren Gewinnungsfaktoren<sup>1</sup> sind der Ausgangspunkt zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen der Uranversorgung. Unter Annahme verschiedener KKW-Ausbauszenarien kann die Frage behandelt werden, ob und wie lange derzeit laufende bzw. in Entwicklung befindliche Reaktorlinien im Einsatz bleiben bzw. zum Einsatz gelangen können.

Für Lagerstätten, deren Ressourcen im Detail verfügbar sind, können auf Basis der geplanten Kapazitäten „mining profiles“ erstellt werden (Abbildung 1). Diese können für verschiedene Ressourcenkategorien und Kapazitätsauslastungen dargestellt werden.

Durch Aufsummieren der einzelnen Produktionsstätten ergibt sich dann ein regionales bzw. globales Bild der Produktion.

Ressourcen, für die keine detaillierten Daten vorliegen oder an denen (z.Z. noch) kein Abbau stattfindet, erfahren eine Annäherung der möglichen Produktion durch eine Hubbertsche Glockenkurve [HUBBERT, 1956] und lassen sich hierdurch dem globalen Bild hinzufügen.

Die Darstellung über eine Glockenkurve kann natürlich nicht völlig mit dem wahren Produktionsverlauf einer Uranmine übereinstimmen. In der Realität existieren Beschränkungen des Marktes und der Infrastruktur und es ist mit einem schnelleren Erreichen der

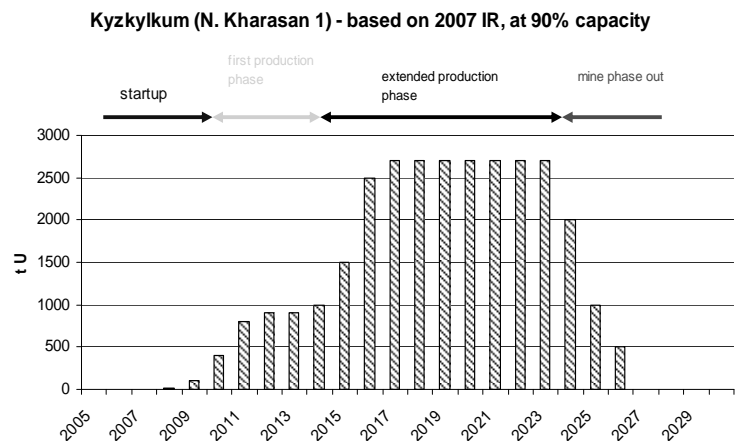


Abbildung 1: Beispiel einer Produktionsprognose, Northern Kharasan 1 inkl. Erweiterung auf 3000t U p.a.

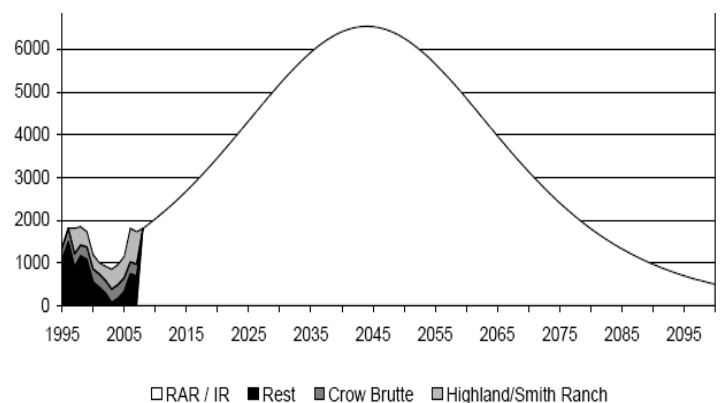


Abbildung 2 Beispiel einer Hubbert-Kurve für die USA

<sup>1</sup> Siehe Definitionen 3.1.1

Produktionskapazitäten zu rechnen. Dennoch stellt diese Darstellungsform eine brauchbare Näherung dar und kann auch mit historischen Produktionskurven recht gut in Einklang gebracht werden.

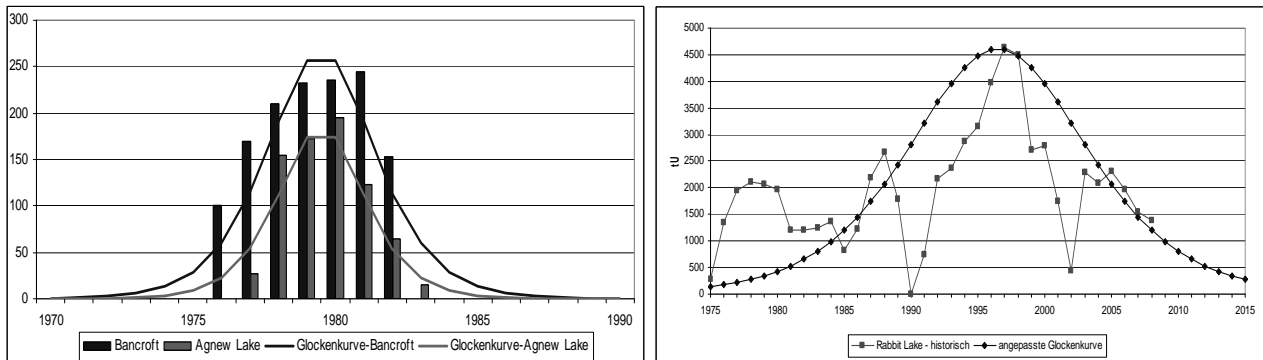


Abbildung 3: Vergleich von Hubbert-Kurven mit historischen Produktionen

### 3 Ressourcenanalyse

Bei Uran handelt es sich um ein reaktives Metall, das in der Natur in Form seiner Minerale vorkommt. Nach der Entstehung des Urans in Supernovae vor mehreren Milliarden Jahren, wurde es im Verlauf der Entstehung des Sonnensystems auch Teil des Erdkörpers. Aus einer ursprünglich gleichförmigen Verteilung reicherte sich das Uran aufgrund seines lithophilen Charakters in der Erdkruste mit einem durchschnittlichen Gehalt von 1,4 ppm an. Die höchsten Anreicherungen finden sich dabei in sauer magmatischem Gestein, aus dem das Uran durch Erosion auch ausgeschwemmt werden kann. Über den Wasserkreislauf kommt es dann zu Ausfällungen in Schiefen und Sandstein und letztendlich gelangt das Uran ins Meer. Natürlich vorkommende Akkumulationen von Uran-Mineralen, aus denen gegenwärtig oder zukünftig Uran geschürft werden können, bezeichnet man als Lagerstätte. Weltweit wurden bisher etwa 1300 Lagerstätten identifiziert, von denen 250 bereits als erschöpft klassifiziert sind [UDEPO].

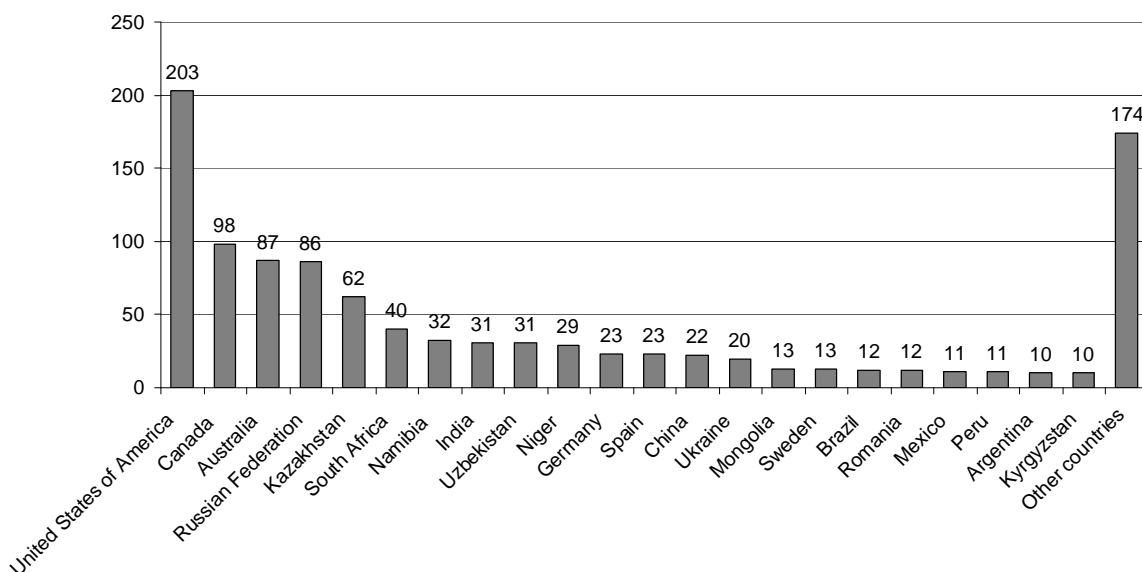


Abbildung 4: Verteilung der Lagerstätten [UDEPO, 2010]

### 3.1 Reserven und Ressourcen

#### 3.1.1 Definitionen

Der Begriff „Ressourcen“ bezeichnet die zur Verfügung stehende Menge eines Rohstoffes. Je besser dabei die äußeren Parameter der Lagerstätten bestimmt sind, desto genauer werden die Ressourcenabschätzungen und eine gute Voraussage über die gewinnbare Menge an Uran kann gemacht werden. Dementsprechend werden Ressourcen in verschiedene Kategorien gemäß der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der verfügbaren Daten eingeteilt.

Für Ressourcenbetrachtungen werden im Allgemeinen zuerst die konventionellen Ressourcen herangezogen. Diese umfassen solche, bei welchen Uran als Hauptprodukt in etablierten Verfahren abgebaut wird, sowie jene, bei welchen man Uran als Zweit- oder Nebenprodukt in entsprechend großer Menge gewinnt. Unkonventionelle Ressourcen weisen einen sehr geringen Urangehalt auf, wie er zum Beispiel im Meerwasser oder in Phosphatlagerstätten zu finden ist.

Die Klassifikation der IAEO unterteilt die konventionellen Ressourcen – entsprechend der Sicherheit ihres Vorkommens – in 4 Ressourcenkategorien:

**(1) Reasonably Assured Resources** (relativ sichere Ressourcen, **RAR**) definieren jene Mengen an Uran, die in gegebenen Kostenspannen und mit erprobten Abbau- und Verarbeitungsmethoden gewinnbar sind. Sie finden sich in Lagerstätten von bestimmter Größe und mit definiertem Urangehalt. Die große Wahrscheinlichkeit ihrer Existenz basiert auf Probenahmen und diversen naturwissenschaftlichen Messungen.

**(2) Unter Inferred Resources** (vermutete Ressourcen) versteht man solche Ressourcen, deren Vorhandensein aus geologischen Beweisen von limitiertem Umfang hergeleitet wird. Die Abschätzung der Menge und Konzentration des Urans ist hier weniger zuverlässig als für RAR.

Die Summe aus Reasonably Assured - und Inferred Resources wird als **Identified Resources** (identifizierte Ressourcen, **IR**) bezeichnet. Diese lassen sich einer bestimmten Lagerstätte/Region zuordnen und werden im Allgemeinen als Basis für Ressourcenabschätzungen verstanden.

**(3) Prognosticated Resources (vorausgesagte Ressourcen, PR)** und

**(4) Spekulative Resources (spekulative Ressourcen, SR)** umfassen unentdeckte Ressourcen, die man in Regionen mit ähnlichen geologischen Gegebenheiten wie die bekannten Lagerstätten vermutet. Sie haben aufgrund ihrer Unbestimmtheit keine wirtschaftliche Bedeutung und finden im Allgemeinen für Verfügbarkeitsprognosen keine Verwendung.

Als **Reserven** werden jene Mengen Uran verstanden die nach aktuellem Stand der Technik zu einem bestimmten Preis förderbar sind. Sie sind durch zumindest eine Machbarkeitsstudie belegt und haben vornehmlich einen ökonomischen Aspekt.

Wesentlich bei der Beschäftigung mit Zahlen zu Ressourcen ist es sich vor Augen zu halten, dass die ausgewiesenen Mengen oft nicht dem entsprechen, was tatsächlich gewonnen werden kann. Dies wird von diversen Faktoren beeinflusst:

- Vielfach werden Ressourcen als In-Situ – also als vor Ort vorhanden – ausgewiesen. Im Rahmen der Verarbeitungskette treten jedoch Verluste auf bzw. kann nicht das gesamte Uran extrahiert werden. Daher müssen je nach angewandter Technik Gewinnungsfaktoren angewandt werden, die zwischen 50% und 95% liegen können.
- Durch Neubewertungen können sich die Klassifikationen ändern (Abbildung 5), oder
- die Verschiebung in eine neue Kostenkategorie erfolgen.

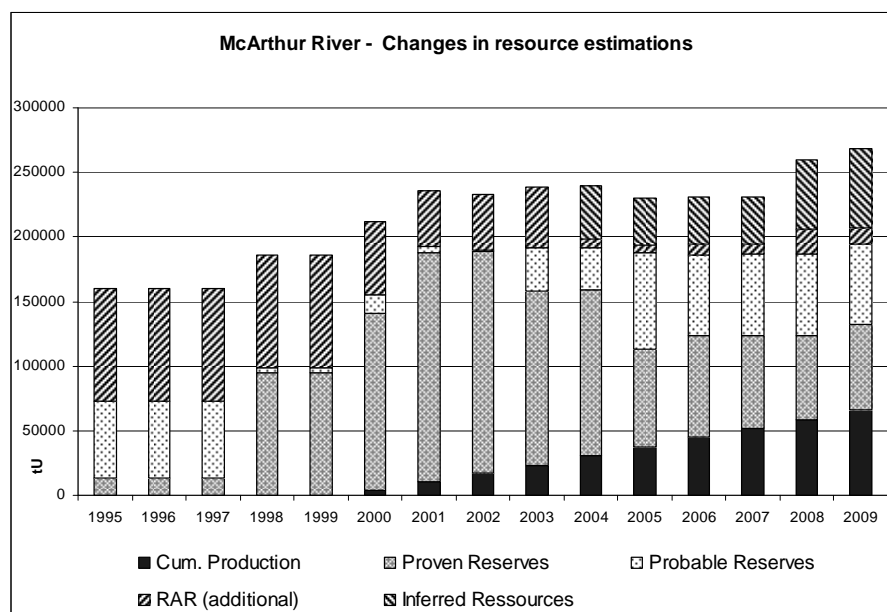


Abbildung 5: Entwicklung der Ressourcenklassifikation – McArthur River [Daten: CAMECO]

## 3.2 Konventionelle Ressourcen

### 3.2.1 Reasonably Assured Resources (RAR)

Weltweit gelten derzeit rund 4,4 Mio. Tonnen Natururan als relativ sicher zu Kosten unter 260\$/kg förderbar [REDBOOK, 2010].

Das Gesamtbild (Abbildung 6, Tabelle 1) zeigt, dass sich mehr als 90% der RAR in 11 Ländern befinden. Dies ähnelt dem Bild der Lagerstättenverteilung (Abbildung 4) und auch dem Bild der größten Produzenten in Kapitel 4. Es zeigt sich also, dass wenige Länder derzeit den Uranmarkt bestimmen und vermutlich auch in Zukunft bestimmen werden. Diese Länder werden in Kapitel 4.1.1 detaillierter betrachtet.

Mit rund 30% der weltweiten RAR hat Australien die größten Ressourcen dieser Kategorie. Die USA besitzen mit fast 500 000 t U die zweitgrößten Ressourcen dieser Kategorie, gefolgt von Kasachstan, welches etwas über 400 000 t RAR ausweist. Während letzteres der derzeit größte Produzent von Uran ist, ist die Produktion in den USA wegen der hohen Produktionskosten eher gering.

Tabelle 1: Reasonably Assured Resources

RAR (2009)	<40 US\$/kgU	<80 US\$/kgU	<130 US\$/kgU	<260 US\$/kgU
Australien		1163000	1176000	1179000
Brasilien	139900	157700	157700	157700
China	52000	100900	115900	115900
Kanada	267100	336800	361100	387400
Kasachstan	14600	233900	336200	414200
Namibia		2000	157000	157000
Niger	17000	42500	242000	244600
Russland		100400	181400	181400
Südafrika	76800	142000	195200	195200
Ukraine	2500	38700	76000	142400
USA		39000	207400	472400
Andere		159200	319000	357300
<b>World Total</b>	<b>569900</b>	<b>2516100</b>	<b>3524900</b>	<b>4004500</b>

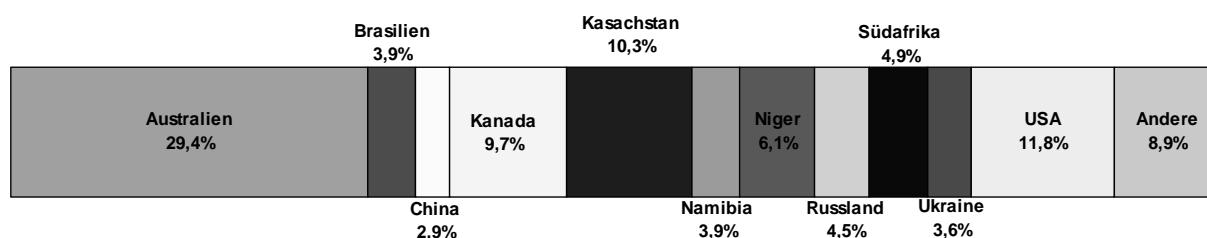


Abbildung 6: Verteilung der Reasonably Assured Resources (RAR) &lt;260\$/kgU [Redbook, 2010]

### 3.2.2 Identified Resources (IR)

Weltweit werden etwa 6,3 Mio. t Uran an Identifizierten Ressourcen angeführt. Das Bild ist ein ähnliches wie das der RAR: Australien besitzt mit Abstand die größten Ressourcen, gefolgt von Kasachstan und Russland.

Tabelle 2: Identified Resources

Identified Resources (2009)	<40 US\$/kgU	<80 US\$/kgU	<130 US\$/kgU	<260 US\$/kgU
Australien		1612000	1673000	1679000
Brasilien	139900	231300	278700	278700
China	67400	150000	171400	171400
Kanada	366800	447400	485300	544600
Kasachstan	44400	475400	651800	832100
Jordanien		111800	111800	111800
Namibia		2000	284200	284200
Niger	17000	73400	272900	275500
Russland		158100	480300	566300
Südafrika	155300	232900	295600	295600
Ukraine	5700	53600	105000	223600
USA		39000	207400	472400
Usbekistan		86200	114600	114600
Andere	0	68800	272000	456500
<b>World Total</b>	<b>796500</b>	<b>3741900</b>	<b>5404000</b>	<b>6306300</b>



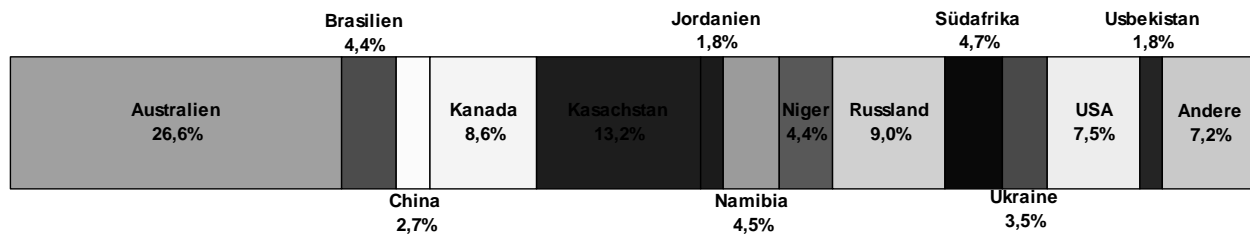


Abbildung 7: Verteilung der Identified Resources <260\$/kgU [Redbook,2010]

### 3.3 Konzentrationen

Die Konzentration („grade“) ist einer der wesentlichen Faktoren für die Wirtschaftlichkeit. Einerseits bedeuten niedrigere Grade höhere Gesteinskosten, vor allem durch den höheren Materialdurchsatz, andererseits eine geringere Ausbeutung aus dem Gestein. Darüber hinaus nähert man sich mit geringer werdenden Konzentrationen jenem Punkt, wo der Energieaufwand zur Urangewinnung der Energieausbeute aus dem Uran entspricht.

Zwischen den unterschiedlichen Lagerstättentypen variiert die Konzentration stark. Im kanadischen Athabasca-Basin finden sich diskordanz-gebundene Lagerstätten mit einem sehr hohen Urananteil von bis zu 20% (Cigar Lake, McArthur River). Andere Vorkommen haben einen Urangehalt der nur im Bereich von 0,025% liegt. Hier lohnt sich ein Abbau nur aufgrund des Vorkommens anderer wertvoller Rohstoffe wie Kupfer, Gold und Silber, wie z.B. in der Lagerstätte Olympic Dam. Die meisten Lagerstätten finden sich in Sandstein mit Konzentrationen zwischen 0,01 und 0,7%.

Die Verteilung der geschätzten Ressourcen in den Lagerstätten (ohne Anwendung von Gewinnungsfaktoren) findet sich in Abbildung 8. Die Darstellung beinhaltet auch die bereits erschöpften Lagerstätten, um zu zeigen, an welchen Lagerstätten historisch Abbau betrieben wurde. Es existieren nur drei Lagerstätten mit Konzentrationen von mehr als 5%, die sich derzeit in Betrieb oder der Erschließungsphase befinden.

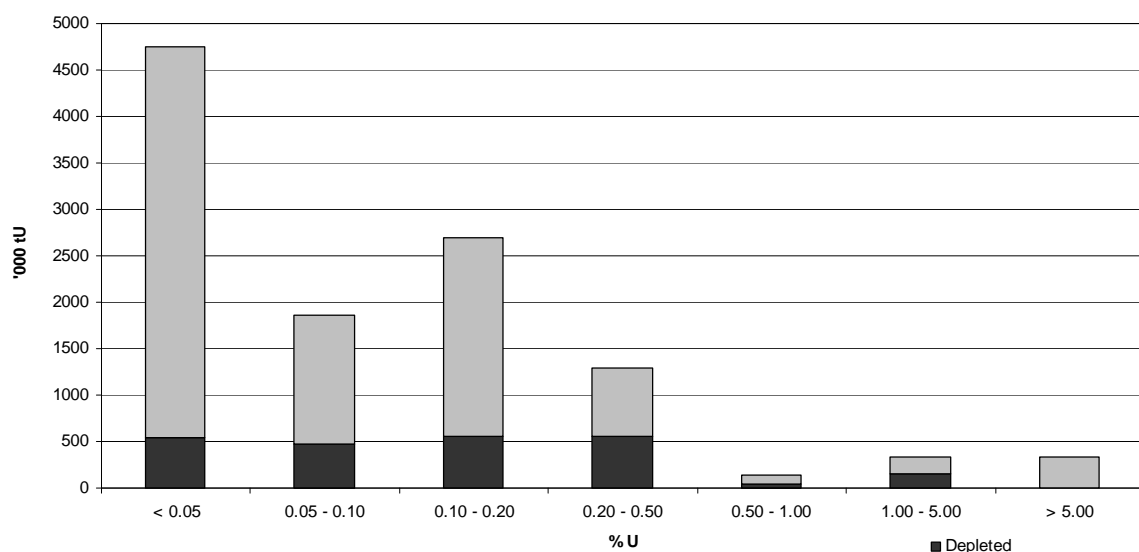


Abbildung 8: Verteilung der globalen konventionellen Ressourcen nach Konzentration [UDEPO, 2010]

### 3.4 Unkonventionelle und Sekundäre Ressourcen

#### 3.4.1 Unkonventionelle Ressourcen

Unkonventionelle Ressourcen weisen, wie bereits erwähnt einen sehr geringen Urangehalt auf. Die vielversprechendste Quelle für unkonventionelles Uran sind Phosphatlagestätten. Die Gewinnung aus **Phosphaten**, wo Uran in niederen Konzentration von 0,06 – 0,0006% vorkommen kann, wurde in der Vergangenheit schon als Nebenprodukt der Düngerherstellung durchgeführt, wurde aber vor mehr als einem Jahrzehnt wieder eingestellt. Große Vorkommen werden den Ländern Jordanien, Mexico, Marokko und den USA zugesprochen, jedoch liegen Abschätzungen zu den vorhandenen Mengen nur in beschränktem Umfang vor. Dennoch scheint es, in Anbetracht der großen Menge, durchaus möglich, dass in Zukunft Uran aus Phosphaten einen Beitrag zur weltweiten Uranproduktion leisten können. Dies wird vom Bedarf an Phosphatdünger, vom Uranpreis und von den technischen Verfahren, dieses in geringer Konzentration vorhandene Uran zu extrahieren, abhängen. Jedoch sieht auch die IAEO [IAEA, 2001] in der Urangewinnung aus Phosphaten nicht mehr Potential als wenige Tausend Tonnen pro Jahr. Auffällig ist, dass diese Methode wieder diskutiert wird, seit sich die Beschwerden der Verbraucher des Phosphatdüngers mehren, dass der hohe Urangehalt im Dünger zu einer Anreicherung in Böden und Grundwasser führen könnte.

Eine weitere oft diskutierte Quelle von Uran ist das **Meerwasser**. Bei einer durchschnittlichen Konzentration von 3 mg U/m<sup>3</sup> Meerwasser werden diese auf 4,5 Milliarden Tonnen Uran geschätzt. Erste Ideen, diese nahezu unerschöpfliche Quelle zu erschließen, indem das Meerwasser durch Filter gepumpt wird, wurden bereits in den 1960er Jahren publiziert, jedoch aufgrund der dazu zu bewegendenden riesigen Wassermengen als undurchführbar eingestuft. Der hierfür benötigte Energieaufwand zum Pumpen läge bereits in der Größenordnung des mit der damit gewinnbaren Uranmenge erzeugten Stromes.

Aktuelle in Japan und Indien verfolgte Pläne sehen nicht mehr eine Bewegung des Wassers vor, sondern das Ausbringen von großflächigem Absorbermaterial in einer leichten Meeresströmung, an dem sich das Uran anlagert. Ein diesbezügliches Experiment, in welchem in 240 Tagen 1kg U gewonnen werden konnte, hat gezeigt, dass diese Lösung im Prinzip technisch umsetzbar wäre. Jedoch wurden für dessen Durchführung 350 kg Absorbermaterial, etwa 10 Tonnen Rahmen- und Strukturmaterial, sowie 160 Tonnen Verankerungsmaterial benötigt. In 14-tägigem Rhythmus musste das Material entnommen, mit Laugen und Säuren abgetrennt und die Folien gereinigt werden. Dieser große Materialaufwand sowie die Tatsache, dass die Folien zur Erreichung ihrer absorbierenden Eigenschaft mit 200 kGy bestrahlt werden müssen, lassen Energiebilanz und Kosten dieser Urangewinnungsmethode als problematisch, wenn nicht sogar prohibitiv erscheinen. Wird eine großtechnische Umsetzung der Urangewinnung aus Meerwasser angestrebt, so gilt es ferner zu berücksichtigen, dass die Herstellung der Absorberfolien energieintensiv ist und aus der begrenzten Ressource Erdöl erfolgt. Ebenso müssen hinsichtlich der ausgedehnten Strukturen u. a. zu erwartende Auswirkungen auf das marine Ökosystem in die Betrachtungen einfließen.

### 3.4.2 Sekundäre Ressourcen

Sekundäre Quellen von Uran sind jene, die nicht der direkten Produktion zuzuordnen sind, umfassen also Lagerbestände (als Natururan oder hoch angereichertes Uran) oder Uran, das aus benutzten Brennelementen wieder gewonnen wird.

Ziel der **Wiederaufbereitung** von verwendeten Brennelementen ist es „reprocessed uranium“ (RepU) und Plutonium für Mischoxid-Brennelemente (MOX) zu gewinnen. Die Wiederaufbereitung wird weltweit jedoch nur in sehr begrenztem Umfang betrieben, da sie einerseits mit hohen Kosten, andererseits auch mit hohem technischem Aufwand verbunden ist, wie beispielsweise die Abtrennung unerwünschter Isotope (insbesondere  $^{232}\text{U}$  und  $^{236}\text{U}$ ). Wiederaufbereiteter Brennstoff wird im Wesentlichen nur in Frankreich und Deutschland genutzt, und sein Anteil am globalen Kernbrennstoffbedarf ist verschwindend gering.

**Lagerbestände** von Uran haben sich in den Jahren der Überproduktion des letzten Jahrhunderts (siehe Abbildung 9) aufgebaut. Die Differenz aus der gesamten weltweiten Uranproduktion und dem in Reaktoren verbrauchten Uran liegt bei etwa 575 000 tU. Dieses findet sich entweder in Lagerbeständen von Natururan oder als hoch angereichertes Uran in Kernwaffen. Größere kommerzielle Lagerbestände an Natururan finden sich in wenigen Ländern und werden in Summe geringer geschätzt, als der globale Reaktorjahresbedarf. Der Großteil des bereits abgebauten Urans liegt in Nuklearwaffen und eben diese Quelle deckt im Wesentlichen auch die derzeitige Bedarfs-Produktions-Differenz. In Kernwaffen liegt das Uran in hoch angereicherter Form vor und kann nach Abreicherung zu Verwendung in Kernreaktoren herangezogen werden. Mit Auslaufen der Abrüstungsverträge 2013 werden diese zusätzlichen Uranreserven jedoch in wesentlich geringerem Ausmaß zur Verfügung stehen.

## 4 Produktion und Bedarf

Die Geschichte der Uranproduktion hat bisher verschiedene Trends durchlebt. Einen ersten Boom erlebte sie in den fünfziger Jahren, welcher von der Entwicklung von Waffen getrieben wurde. Eine zweite Wachstumsphase erlebte die Produktion mit der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Kernkraftwerke, die ihr Maximum mit rund 70 000 Tonnen im Jahr 1979 hatte, was weit über dem damaligen Bedarf lag. Am Ende des Kalten Krieges änderte sich der Markt. Uran Lagerbestände aus der UdSSR, die dem Markt zugänglich gemacht wurden, sowie Abreicherung von waffenfähigem Uran führten zu einem Rückgang der Nachfrage und des Preises von Uran. Heute wird die Uran Nachfrage aus drei verschiedenen Quellen gedeckt:

- Wiederaufbereitung
- Lagerbestände
- Konventioneller Bergbau

Im Jahr 2009 betrug der Bedarf an Uran – exklusive MOX und wieder aufbereitetem Uran – etwas mehr als 65000 tU, wovon drei Viertel direkt aus dem Bergbau gedeckt werden konnten. Der Rest wird durch Bestände von Natururan und hoch angereichertem Uran (HEU) gedeckt. Die Tatsache, dass nicht sehr viele Lagerbestände vorhanden sind und auch nur begrenzt Waffen zur Abrüstung (siehe Kap. 3.4.2), macht deutlich, dass die Minenlandschaft ein deutliches Wachstum erleben muss, um auch den zukünftigen Bedarf zu decken.

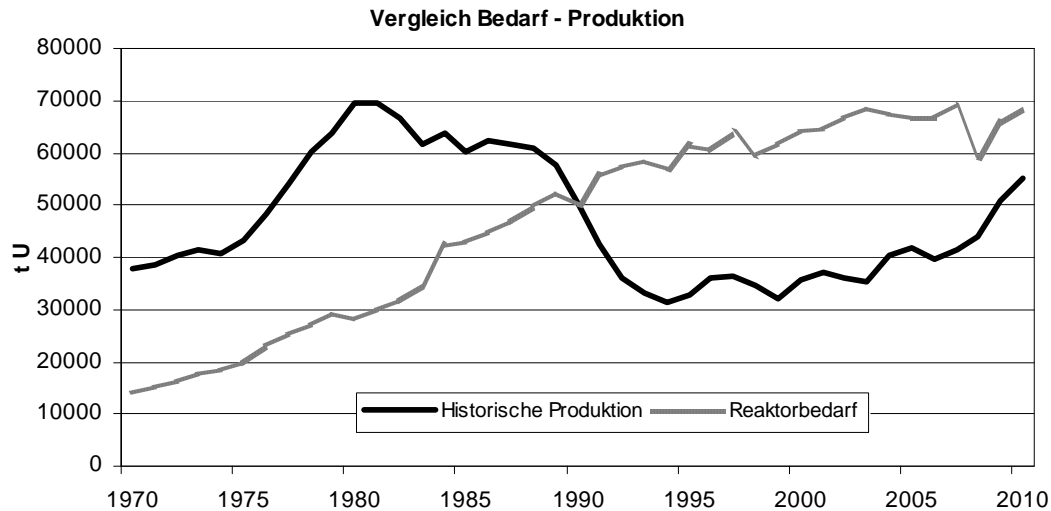


Abbildung 9: Vergleich von historischer Produktion und Bedarf von Uran [Daten: IAE0]

#### 4.1.1 Key Countries

Die Darstellungen zu Lagerstätten (Abbildung 4) und Ressourcen (Tabelle 2) zeigen, dass die Verteilung von Uranlagern auf wenige Länder beschränkt ist.

Betrachtet man die RAR (Abbildung 6), so sind es Australien, Namibia, Niger, Kanada, Kasachstan, Russland, USA, Brasilien, China, Südafrika und die Ukraine, die über Ressourcen von mehr als 100 000 tU verfügen. Auf der Produktionsseite findet man dieselben Länder als größte Produzenten wieder – lediglich Usbekistan dessen Ressourcen auf ~76000tU geschätzt werden, gesellt sich dazu. Diese Aufteilung hat sich historisch (Abbildung 10) ähnlich dargestellt und es ist davon auszugehen, dass diese Länder auch in Zukunft den Uranmarkt bestimmen werden.

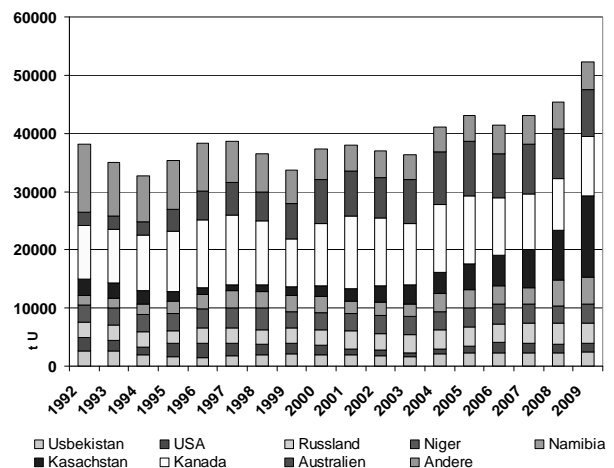


Abbildung 10: Historische Produktion nach Ländern

Die größten Ressourcen finden sich, wie bereits erwähnt, in Australien. Fast drei Viertel der Landesressourcen finden sich dort in der Lagerstätte Olympic Dam. Dies ist ein wesentlicher Punkt, der bei einem Versorgungsszenario zu berücksichtigen ist, da hier auf jeden Fall ein Kapazitätslimit für den Abbau anzunehmen ist, was bedeutet, dass nicht das gesamte Uran auf einmal, sondern über einen Zeitraum von mehreren Dekaden förderbar ist.

Einen Sonderstatus nimmt die Entwicklung der Minenlandschaft Kasachstans ein (Abbildung 11). Binnen weniger Jahre ist das Land von einem mittelgroßen zum weltweit mit Abstand größten Produzenten aufgestiegen. Die Bemühungen Kasachstans, seine Produktion auszubauen zeigen, dass ausgeglichene Bilanz von Produktion und Bedarf und damit eine Unabhängigkeit von sekundären Ressourcen erreichbar ist. Betrachtet man jedoch die Gesamtressourcen des Landes, so zeigt sich, dass ein Wachstum nicht von langer Dauer

sein kann und nach wenigen Jahren wieder mit einem deutlichen Rückgang zu rechnen sein wird.

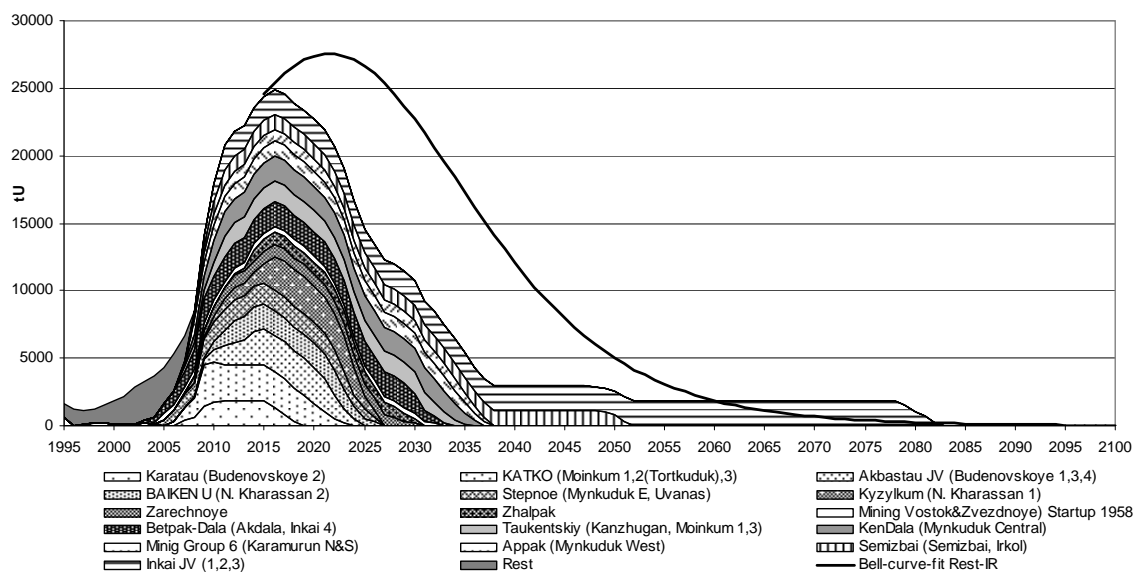


Abbildung 11: Produktionsszenario Kasachstan auf Basis der Identifizierten Ressourcen  
Die eingefügte Glockenkurve stellt die gesamt verfügbaren Identifizierten Ressourcen dar.

#### 4.1.2 Vorlaufzeit zur Erschließung neuer Lagerstätten

Der Weg von der Suche hin zur Betriebsaufnahme an einer Lagerstätte beinhaltet viele Zwischenschritte. Er beginnt bei einer grobmaschigen Exploration aus der Luft und anschließenden Bodenmessungen. Dem folgen erste Testbohrungen und diverse feasibility studies. Begleitend gilt es Genehmigungsverfahren abzuwarten, bis eine Mine nach einer Pilotphase in den kommerziellen Betrieb gehen kann. Die Abarbeitung dieser Schritte dauert viele Jahre. Zusätzlich zeigt sich, dass sich diese Zeitspanne stetig verlängert und von etwa 10 Jahren in den 1970ern auf mittlerweile über 30 Jahre angewachsen ist. Die Gründe dafür werden in den folgenden Faktoren gesehen:

- Die am leichtesten zugänglichen Lagerstätten wurden bereits bis 1975 in Betrieb genommen.
- Strengere Umweltauflagen verlängern den Zeitraum von der Entdeckung bis zur Inbetriebnahme einer Mine.
- Niedrige Uranpreise haben den Start neuer Minen verzögert.
- Die Sortierung der bekannten Lagerstätten nach ökonomischen Kriterien führte dazu, dass zunehmend die ehemals ungünstigen Projekte erschlossen werden müssen. Dies ist allerdings auch ein Indiz dafür, dass neue Funde selten sind.

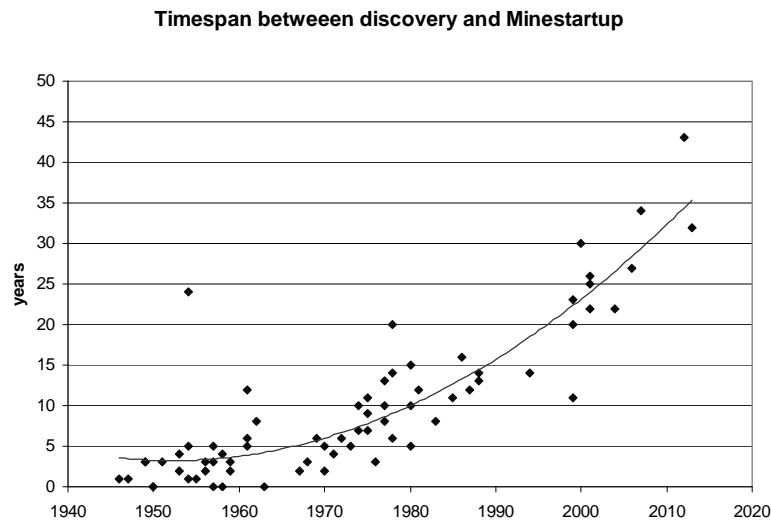


Abbildung 12: Entwicklung der Zeitspanne zw. Entdeckung einer Lagerstätte und Eröffnung der Minen. (Für zwei Minen ist die geplante Inbetriebnahme 2012 bzw. 2013 ausgewiesen)[OECD, 2004, erweitert mit eigenen Daten]

## 5 Ausblick

Ausgehend von den gesammelten Minendaten sowie Gesamtdaten der verschiedenen Länder, lassen sich Szenarien für eine zukünftige Uranproduktion erstellen. Diese bauen einerseits auf den verschiedenen einzelnen Minen, andererseits auf zusammengefassten Gesamtkurven für die „Restressourcen“ auf. Für 2009 konnten 75% der Ressourcen direkt den existierenden Produktionsstätten zugeordnet werden. Gerade für die Hauptproduzenten (s.o. Kap.4.1.1) finden sich umfangreiche Datensätze. Insbesondere für Australien, Namibia, Niger, Kanada, Kasachstan und Russland lassen sich Ressourcen und Produktionserwartungen sehr genau bestimmen. Für die USA, Südafrika und China wurden einzelne Länderglockenkurven erstellt. Usbekistan, Brasilien und die Ukraine wurden den globalen Kurven zugeteilt.

Aus einer Aufsummierung aller dieser Produktionsprognosen ergibt sich ein globales Szenario, das einen Vergleich mit Bedarfsszenarien eines zukünftigen Reaktorparks zulässt.

Neben den Ressourcenkategorien sind auch Kapazitätsauslastungen der Minen relevant für das globale Bild. Historische Produktionsverläufe zeigen, dass Minen nicht immer am maximalen Output arbeiten (können). In der vorliegenden Arbeit wurden der Auslastungsfaktor mit 90% (relativ hoch<sup>2</sup>) angesetzt.

---

<sup>2</sup> Der langjährige Durchschnitt liegt bei etwa 76%. Die letzten Jahre wiesen jedoch höhere Auslastungen aus (etwa 80%) und mit steigender Nachfrage kann auch mit noch höheren Kapazitätsfaktoren gerechnet werden.

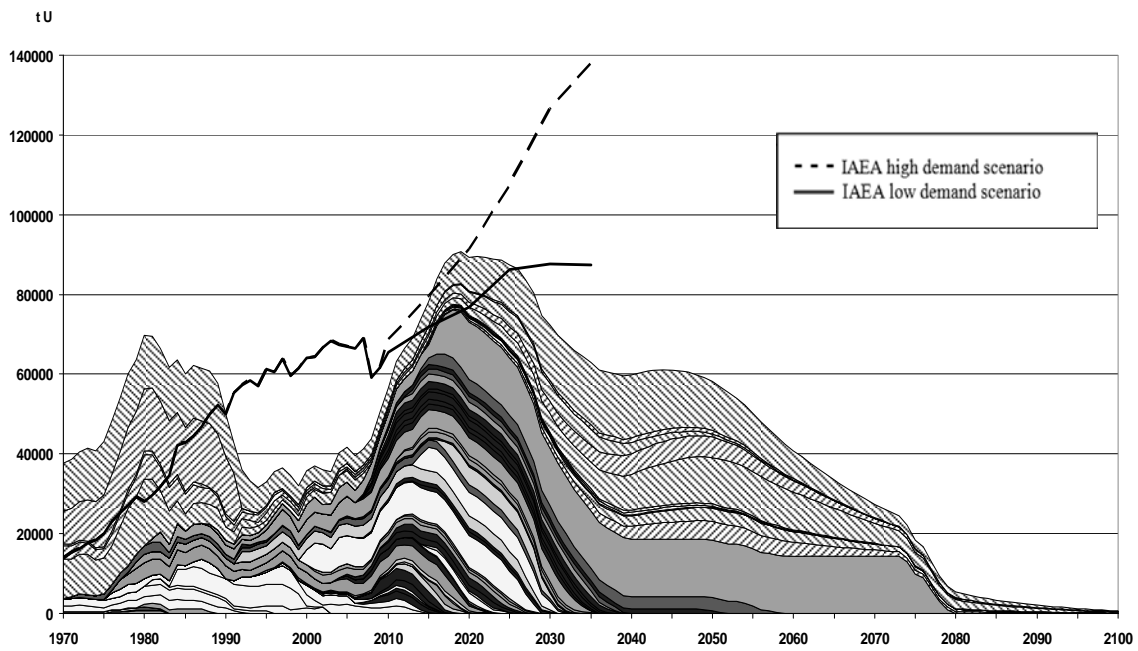


Abbildung 13: Szenario der globalen Uranverfügbarkeit auf Basis der RAR.  
(< 260\$/kg Uran, 90% Kapazitätsauslastung)  
Wachstumserwartungen für den Bedarf werden durch zwei Prognosen der IAEO dargestellt.

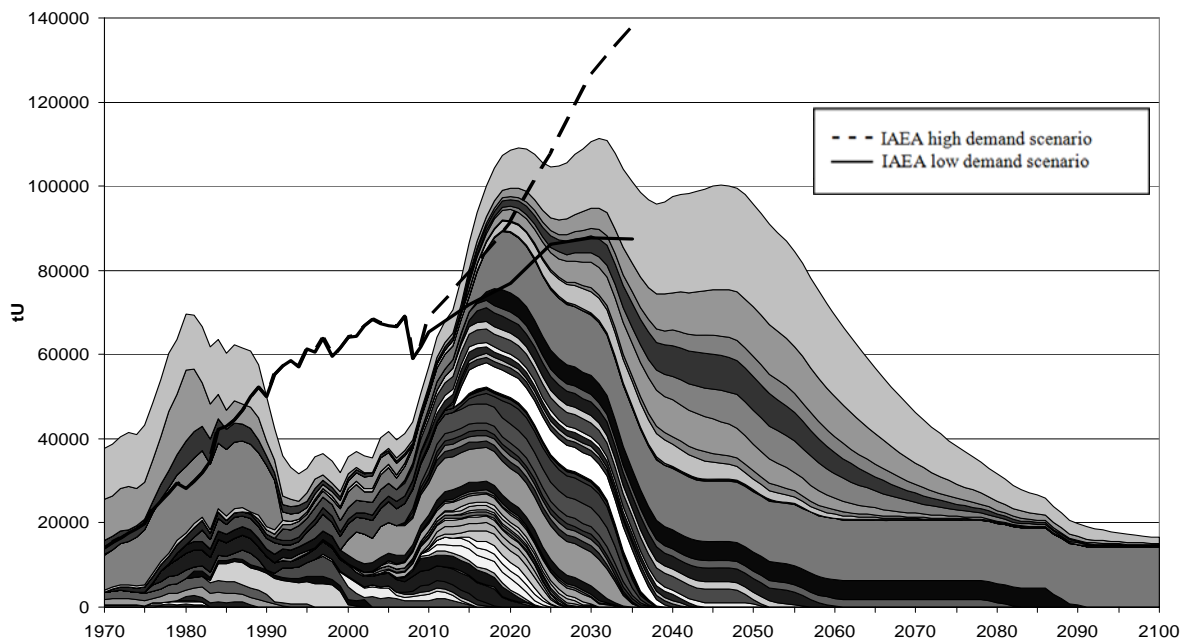


Abbildung 14: Szenario der globalen Uranverfügbarkeit auf Basis der Identified Resources (IR)  
(< 260\$/kg Uran) und 90% Kapazitätsauslastung. Wachstumserwartungen für den Bedarf werden  
durch zwei Prognosen der IAEO dargestellt.

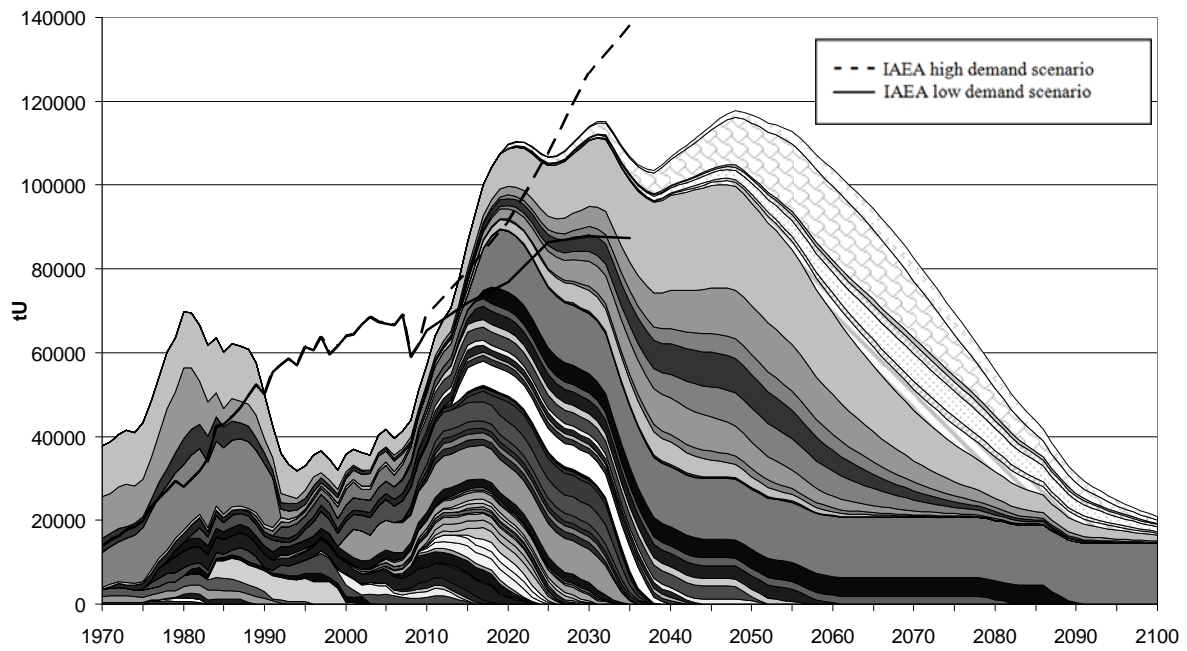


Abbildung 15: Szenario auf Basis der IR plus PR  
( $< 260\$/\text{kg}$  Uran) und 90% Kapazitätsauslastung. Es wurden 50% der globalen prognostizierten Ressourcen als gewinnbar angenommen und ab 2020 über Glockenkurven dem Szenario hinzugefügt.

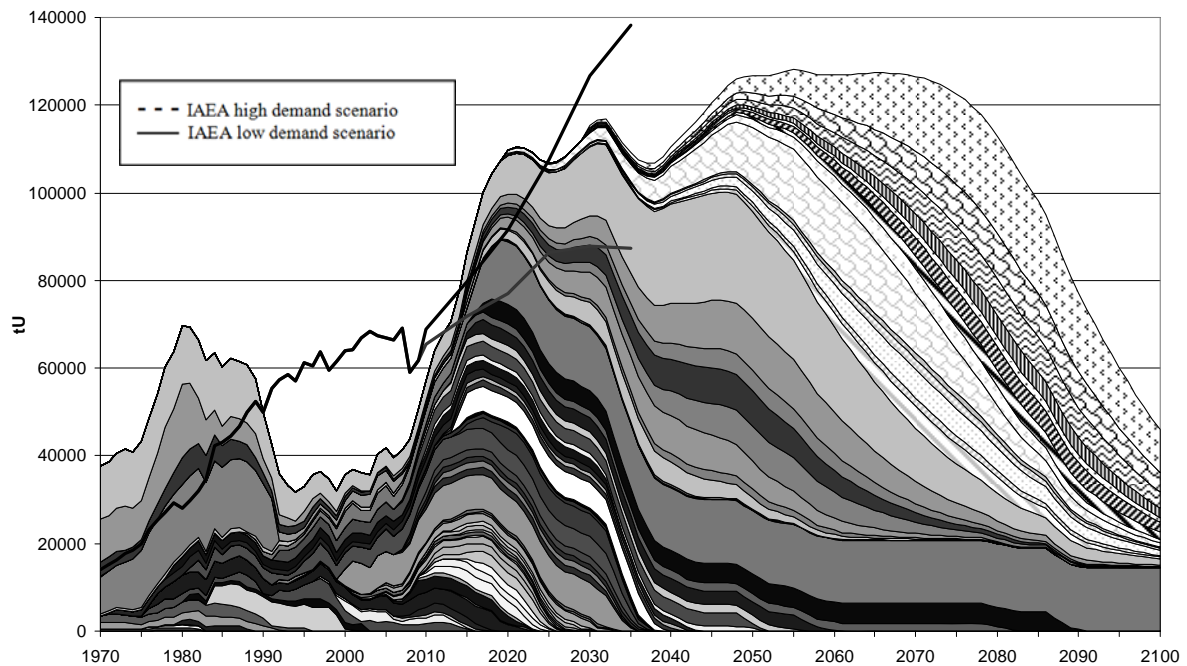


Abbildung 16: Szenario auf Basis der IR plus prognostizierte und spekulative Ressourcen  
( $< 260\$/\text{kg}$  Uran, 90% Kapazitätsauslastung). Es wurden 50% der globalen PR sowie 30% der SR als gewinnbar angenommen und ab 2020 bzw. 2030 über Glockenkurven dem Szenario hinzugefügt.



## 6 Schlussfolgerungen

Bei Betrachtung der Produktionsszenarien (Abbildung 13 - Abbildung 16) lassen sich verschiedenen Ableitungen für die unterschiedlichen Ressourcenkategorien treffen.

- Mit den derzeit bekannten RAR lässt sich kein Wachstum des Reaktorparks versorgen. Ein Peak in der Produktion ist um 2020 zu erwarten.
- Die Identifizierten Ressourcen können ein Wachstum unterstützen, jedoch nicht mehr als einen Bedarf von 100000 tU bis 2050 decken. Hierbei ist mit einem Peak in der Produktion um 2030 zu rechnen.
- Addiert man prognostizierte und spekulative Ressourcen, so lassen sich entsprechend der Szenarien verlängerte Reichweiten auf einem leicht erhöhten Niveau erreichen, wobei die prognostizierten Ressourcen einen eher geringen Beitrag leisten. Ein hohes Bedarfsszenario scheint auch in diesen Fällen nicht nachhaltig realisierbar.

Als wesentliches Ergebnis zeigt sich auch, dass das Erreichen einer ausgeglichenen Produktions-Bedarfs-Bilanz möglich scheint, wodurch der Bedarf an sekundären Ressourcen vorläufig verringert werden kann. Verantwortlich dafür ist das Wachstum der Produktion in Kasachstan. Andererseits hat sich gezeigt, dass sich die Zeitspanne zwischen Entdeckung und Produktionsbeginn einer Uranlagestätte auf mittlerweile etwa 30 Jahre erhöht hat. Um eine globale Versorgungssicherheit mittelfristig gewährleisten zu können ist daher schon frühzeitig eine zukunftsorientierte Planung nötig. Hier könnte wiederum die gesteigerte Produktion in Kasachstan dem Weltmarkt vorspielen, dass genug Uran vorhanden ist und daher zusätzliche Exploration bremsen. Darüber hinaus zeigen die Prognosen für Kasachstan auch, dass die schnelle Ausweitung zu einem ebenso schnellen Rückgang führt, sobald die erschöpften Minen nicht mehr adäquat ersetzt werden können.

Ein weiterer Aspekt, der vor allem über Olympic Dam – der größten Lagerstätte der Welt – herzuleiten ist, ist, dass es für Uran ein begrenztes Fördervolumen gibt, wenn es in wenigen großen Lagerstätten liegt. Durch die daraus resultierenden langen Förderzeiträume ergibt sich, dass die Reichweite, selbst bei gleichbleibendem Reaktorpark, geringer ist als die verfügbaren Reserven geteilt durch den derzeitigen Bedarf.

Ein Blick auf die globale Verteilung und Produktionskapazitäten zeigt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit der Uranmarkt auch in Zukunft von Australien, Kanada, Kasachstan, Niger und Namibia bestimmt werden wird, und zu Teilen von Russland und den USA.

## Literatur

- [CAMECO] Cameco - Annual Information Form 1995-2009
- [HUBBERT, 1956] HUBBERT M. King, Nuclear energy and the fossil fuels, (1956)
- [IAEA, 2001] IAEA, Analysis of Uranium Supply to 2050, (2001)
- [OECD 2004] Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective "The Red Book Retrospective" OECD 2006
- [REEDBOOK, 2010] IAEA, Uranium 2009: Resources, Production and Demand, (2010)
- [UDEPO, 2010] World Distribution of Uranium Deposits Database (UDEPO), <http://www-nfcis.iaea.org/UDEPO/UDEPOMain.asp>, accessed Dec. 2010

## Glossar

HEU	Highly Enriched Uranium, hoch angereichertes Uran
IR	Identified Resources, Identifizierte Ressourcen
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
KKW	Kernkraftwerk
MOX	MischOxid-Brennelement
PR	Prognostizierte Ressourcen
RAR	Reasonably Assured Resources, relativ sichere Ressourcen
SR	Spekulative Ressourcen
t U	Tonnen Uran, metrisch