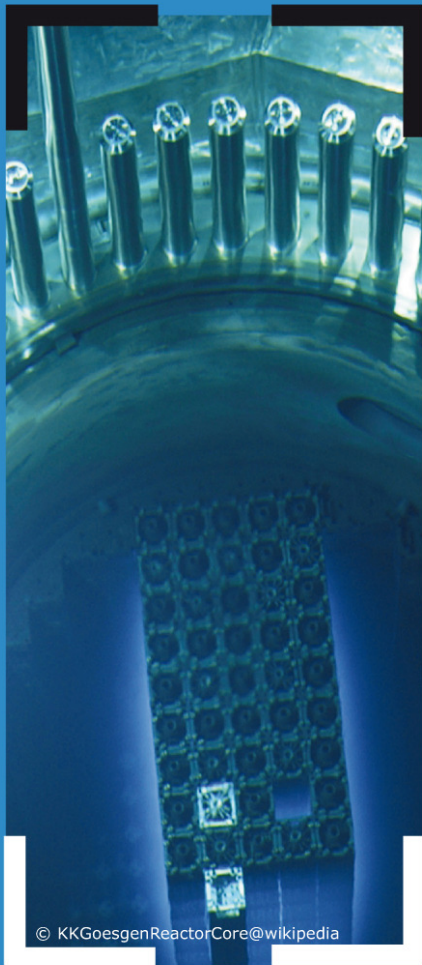


# Energiebilanz der Nuklearindustrie



Analyse von Energiebilanz und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Nuklearindustrie über den Lebenszyklus

**Zusammenfassung / Reichweite der Uranressourcen**

## Impressum

---

### **AutorInnen**

#### ***Österreichisches Ökologie-Institut:***

Mag.<sup>a</sup> Andrea Wallner (Gesamtleitung)

Ing.<sup>in</sup> Antonia Wenisch

#### ***Austrian Energy Agency:***

Dr. Martin Baumann (Modellierung)

Dr. Stephan Renner

**Layout Titelblatt:** Ulli Weber

**Lektorat:** Dr. Margaretha Bannert

**Programmsteuerung:** Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:** Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Wien 2011

Das der Studie zu Grunde liegende Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen der 2. Ausschreibung des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ als Grundlagenforschung durchgeführt.

Originaltitel des Forschungsprojektes (Forschungsantrag): LCA-Nuklearindustrie – Energiebilanz der Nuklearindustrie über den Lebenszyklus – ein Argumentarium zur Entwicklung der Kernenergie.

**Die Studie „Energiebilanz der Nuklearindustrie“ wurde durch eine Zusatzförderung der Wiener Umweltschutzanstalt um das Thema Uranressourcen erweitert, welches gemeinsam mit der Zusammenfassung im Folgenden präsentiert wird.**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIE</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>URANRESSOURCEN</b>	<b>9</b>
2.1	Grundlagen	9
2.2	Kategorisierung der Uranressourcen lt. OECD/NEA (2010)	10
2.2.1	Konventionelle Ressourcen	11
2.2.2	Unkonventionelle Ressourcen	12
2.3	Höhe der Uranressourcen	13
2.3.1	Red Book (OECD/NEA 2010)	13
2.3.2	IAEA-Datenbank	16
2.4	Entwicklungsszenarien des KKW-Parks und Uranbedarf	17
2.4.1	Szenarien aus der Literatur	17
2.4.2	Szenarien im EBN-Modell	18
2.5	Reichweite der Ressourcen	19
2.5.1	Angaben der Literatur	19
2.5.2	Einfluss von Erzgehalt/Abbautiefe	22
2.5.3	Ergebnisse des EBN-Modells	23
2.6	Uranbereitstellung versus Uranbedarf	25
2.6.1	Primäre Uranbereitstellung: Uranabbau	25
2.6.2	Sekundäre Uranbereitstellung	25
2.6.3	Versorgungsengpässe	26
2.7	Zusammenfassung/Schlussfolgerungen	27
<b>3</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>29</b>



# 1 Zusammenfassung der Studie

## Hintergrund

Der Unfall im japanischen Kraftwerk Fukushima im März 2011 löste eine Debatte über den Ausstieg aus der Kernenergie und die Sicherheit von Kraftwerken aus. Verschiedene Staaten planen ein Ende des Einsatzes der Kernenergie. Gleichzeitig neigt sich die Nutzungsdauer vieler Kernkraftwerke ihrem Ende zu. Regierungen und Kraftwerksbetreiber stehen deshalb vor der Frage, ob sie alte Kernkraftwerke (KKW) durch neue Reaktoren ersetzen oder andere Energiequellen nützen sollen. Insbesondere aus den Anforderungen zur Reduktion von Treibhausgasen (THG) wird die Notwendigkeit eines verstärkten Einsatzes der Kernenergie abgeleitet.

Eine Bewertung des Beitrages der Kernenergie für den Klimaschutz verlangt die Betrachtung des gesamten **Lebenszyklus**. In den einzelnen Prozessschritten ist zum Teil ein mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbundener Energieaufwand nötig. Während bei fossilen Technologien die dem Betrieb vor- und nachgelagerten Treibhausgasemissionen ca. 25 % der direkten Emissionen ausmachen können, sind es bei der Kernenergie bis über 90 % (Weisser 2007). Der Ressourcen- und Energiebedarf muss daher über die gesamte nukleare Brennstoffkette berücksichtigt werden, vom Uranabbau, über die Anreicherung des Brennstoffes bis hin zur Dekommissionierung des Kraftwerkes und zur Endlagerung der Brennstoffe. Abbildung 1 zeigt in einem stark vereinfachten Schema die Hauptprozessschritte der nuklearen Brennstoffkette.

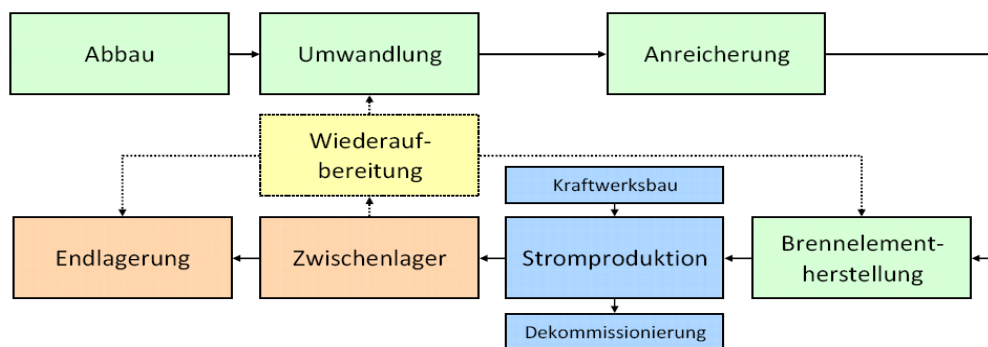


Abbildung 1: Hauptprozessschritte der nuklearen Brennstoffkette

## Zielsetzung der Studie

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, Informationen über die Energiebilanz der Stromproduktion aus Nuklearenergie über den Lebenszyklus zu gewinnen.

Folgende Kernfragen sollen geklärt werden:

- Wie wirkt sich das prognostizierte Sinken des Erzgehaltes von Uranvorkommen auf Energieintensität und Treibhausgasemissionen aus und ab welchem Erzgehalt wird kein Energieüberschuss mehr produziert?
- In welchem Bereich liegen die aus Nuklearenergie resultierenden Energieüberschüsse und Treibhausgase?
- Welche Faktoren einschließlich des Erzgehaltes haben den größten Einfluss auf den Energieüberschuss?

## Analyse der vorhandenen Literatur

In der Literatur wird ein Zusammenhang zwischen Erzgehalt und Energieintensität hergestellt. Die Energieintensität ist der Energieaufwand über die gesamte nukleare Brennstoffkette, der für die Erzeugung einer kWh<sub>el</sub> nötig ist (Energieinput/Energieoutput). Ab einem bestimmten Uranerzgehalt (Grenzerzgehalt) steigt die Energieintensität von Kernkraftwerken auf über 100 %. In diesem Fall wird die Energiebilanz negativ, es wird also kein Energieüberschuss mehr produziert und der Betrieb eines Kernkraftwerks mit solchem Brennstoff ist aus energetischer Sicht nicht mehr sinnvoll.

Die **Bandbreite der Energieintensität** der betrachteten Studien (Abbildung 2) bewegt sich bei mittleren Erzgehalten (Erzgehalt von 0,15 % bis 0,26 %) zwischen 2 % und 50 %. Die aktuelle Studie von ISA (2006) ermittelt bei der Energieintensität eine Bandbreite von 10 % bis 30 %, mit einem Mittelwert von 18 %.

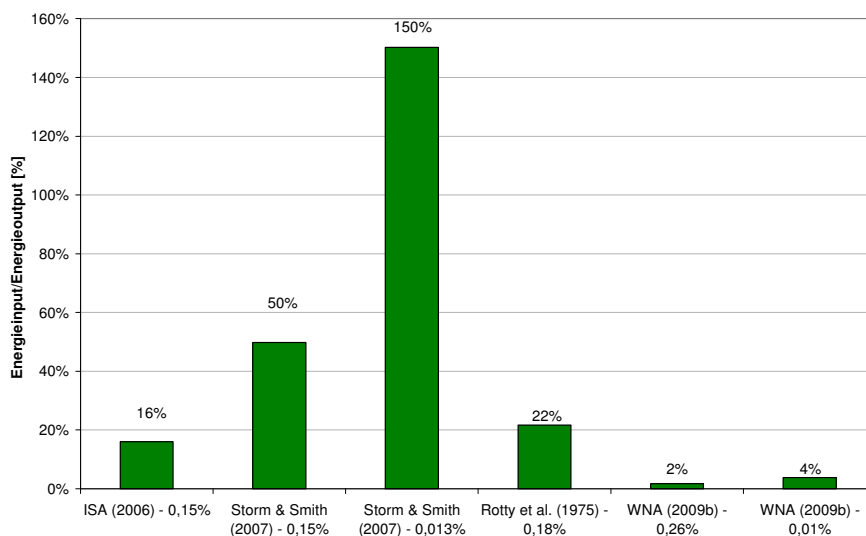


Abbildung 2: Energieintensität der nuklearen Brennstoffkette – Vergleich der Gesamtergebnisse verschiedener Studien unter Berücksichtigung des Uranerzgehaltes

Trotz der hohen Bandbreite der Endergebnisse ist sich die Literatur über die zentrale Bedeutung des **Erzgehaltes** für die Energiebilanz einig: Bei einem niedrigen Erzgehalt von ca. 0,01 % wird die Erzaufbereitung des Urans zum Prozessschritt mit dem höchsten Energieaufwand (über 40 % des gesamten Energieaufwandes). Die Energieintensität weist in der Literatur allerdings eine sehr hohe Bandbreite auf (4–150 %): Die Ergebnisse reichen also von einem hohen Energieüberschuss bis zu einer negativen Energiebilanz.

Eine der wenigen Studien, die die Änderung des Erzgehalts der Uranvorkommen mit einbezieht, ist die Studie Storm van Leeuwen und Smith (2007; 2008). Ab einem Grenzerzgehalt von 0,013 % wird laut den Berechnungen von Storm/Smith die Energiebilanz negativ. Dieser Erzgehalt wird bei gleichbleibender installierter nuklearer Kapazität im Jahr 2078 und bei einer jährlichen Kapazitätssteigerung von 2 % schon im Jahr 2059 erreicht sein.

Die Prozessschritte vor und nach dem Kraftwerk verursachen **Treibhausgasemissionen**. Die Angaben über die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kernenergie schwanken in der Literatur zwischen 2 und 288 g/kWh<sub>el</sub>. Der höchste Wert von 288 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> ist auf einen sehr niedrigen Erzgehalt von 0,013 % bezogen (Storm/Smith 2007). ISA (2006) kommt auf Werte von durchschnittlich ca. 60 g CO<sub>2</sub>/kWh. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich verschiedener Literaturergebnisse von CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kernenergie laut Sovacool (2008).

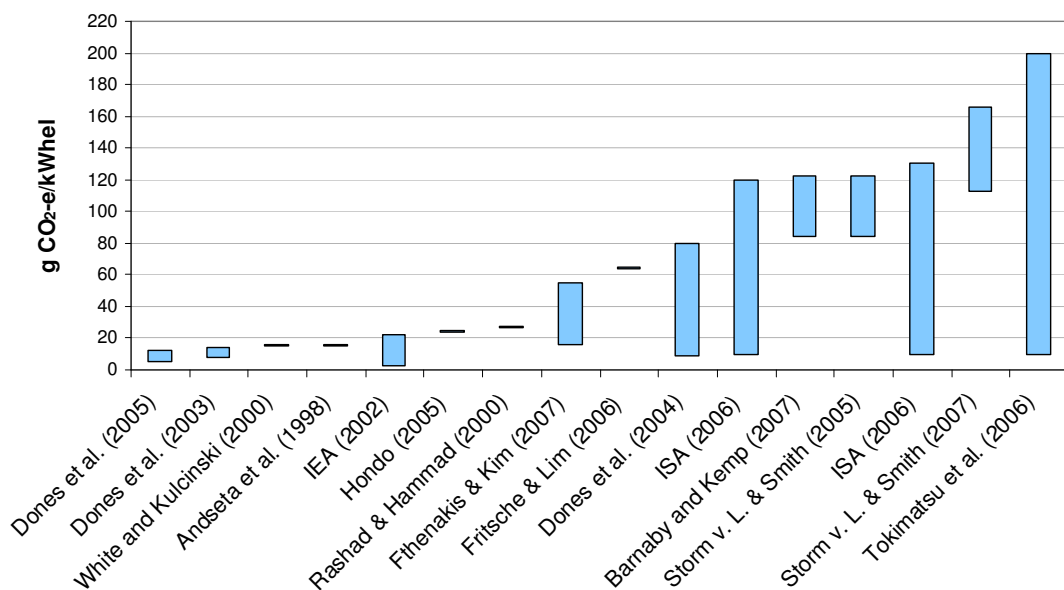


Abbildung 3: Treibhausgasintensität der nuklearen Brennstoffkette – Vergleich der Bandbreiten verschiedener Studien (Min – Max) nach Sovacool (2008)

## Ziel und Methodik der Energiebilanz Nuklear (EBN-Modell)

Da die in der Literatur vorgefundenen Daten nicht den Detaillierungsgrad aufweisen, der zur Beantwortung der Forschungsfragen nötig ist, wurde der Großteil der nuklearen Prozesskette mit eigenen **Bottom-up-Berechnungen** modelliert. In einem Modell (**Energiebilanz Nuklear, EBN**) wird der über die nukleare Brennstoffkette nötige Energieinput dem Energieoutput des Kernkraftwerks gegenübergestellt. Dabei wird sowohl die direkte Energie, also die eingesetzte elektrische und thermische Energie, als auch die indirekte Energie, die in Materialien steckt, in die Berechnungen miteinbezogen. Energie, die zum Bau und zur Dekommissionierung (Abbau) von Anlagen benötigt wird, die in der Prozesskette zum Einsatz kommen, wurde ebenfalls, soweit möglich, in die Berechnungen aufgenommen. Ein Großteil der nuklearen Prozesskette wurde dadurch modelliert, der Rest der Daten wurde aus der Literatur bezogen. Die Eingangsdaten wurden aus Fachliteratur, weitere Daten aus anderen Bergbauarten sowie ExpertInnenbefragungen ermittelt.

Der Fokus der Berechnungen liegt auf dem **Uranabbau**. Sowohl der voraussichtlich sinkende Erzgehalt als auch die Uranförderung aus unterschiedlichen Abbautiefen und Minenarten werden berücksichtigt.

Allerdings ist zu beachten, dass die Bottom-up-Methode nicht alle Prozessschritte erfassen kann, die einen Energieverbrauch verursachen, und die Ergebnisse des Modells daher **Mindestwerte** darstellen, die im tatsächlichen Lebenszyklus einer kWh Strom aus Uran tendenziell höher sein werden.

Mit Hilfe des EBN-Modells wurden Aussagen gewonnen zu folgenden Fragen:

- Plausible Bandbreite für Energieintensität und Treibhausgasemissionen der nuklearen Brennstoffkette
- Sensitivität der Ergebnisse auf verschiedene Eingangsparameter
- Grenzerzgehalt
- Zeitliche Reichweite der Uranressourcen
- Plausibilität der Ergebnisse anderer Studien

## Ergebnisse des EBN-Modells

Um zu einer plausiblen Bandbreite an Ergebnissen zu kommen, wurden die Ergebnisse im EBN-Modell für verschiedene Szenarien berechnet: Die angenommenen Szenarien unterscheiden sich in Anteilen der Minentypen (Übertagbau, Untertagbau, In Situ Leaching) bzw. Anreicherungstechnologien sowie Transportdistanzen und Reaktorparametern. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse im Vergleich zur Bandbreite der untersuchten Literatur.

Tabelle 1: Bandbreite der Hauptergebnisse im Vergleich zur Literatur

	<b>Energieintensität [%]</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen [g/kWh]</b>
<b>Ergebnisse des EBN-Modells:</b>		
Szenarien mit Erzgehalt 0,1–2 %	2–4	14–26
Szenarien mit Erzgehalt 0,01–0,02 %	14–54	82–210
Grenzerzgehalt von 0,0086 % im Szenario „Average“	100	563
Alle Szenarien	2–54	14–210
<b>Bandbreite der untersuchten Literatur</b>	1,7 <sup>1</sup> –108	2–288 <sup>2</sup>

In Szenarien mit Erzgehalten von 0,1 bis 2 % liegt der Energieaufwand für die Erzeugung einer kWh<sub>el</sub> bei 2 bis 4 %. Bei sinkendem Erzgehalt (0,01 % und 0,02 %) steigt dieser Energieaufwand auf 14–54 %. Daraus entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Höhe von 82–210 g/kWh. Der Erzgehalt wird zum entscheidenden Einflussfaktor.

Ab einem bestimmten Erzgehalt (**Grenzerzgehalt**) wird der Energieaufwand für den Uranabbau so groß, dass die Gesamtenergiebilanz negativ wird. Abbildung 4 stellt den Grenzerzgehalt für das Szenario „Average“ dar: Bei einem Erzgehalt von ca. 0,02 % abwärts steigt der nötige Energieaufwand im Verhältnis zum Output stark an, bis er ihn schließlich bei unter 0,008 bis 0,012 % übertrifft. Ab diesem Erzgehalt erzeugt der Betrieb von Kernkraftwerken keinen Energieüberschuss mehr. Bei niedrigen Erzgehalten reagieren die Ergebnisse außerdem stark sensitiv auf Änderungen in der Abbautiefe und der Extraktionseffizienz.

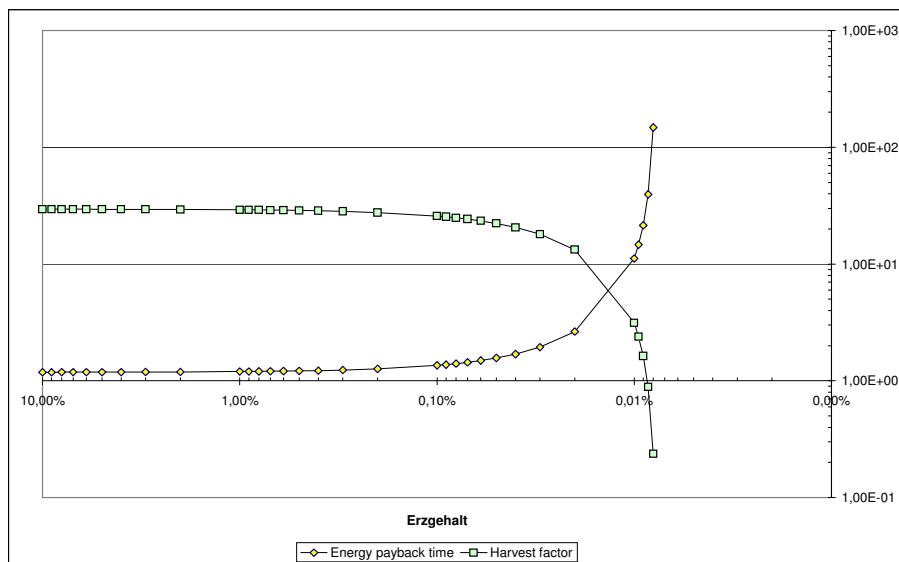


Abbildung 4: Energieüberschuss in Abhängigkeit vom Erzgehalt

Diese starke Abhängigkeit des Energieüberschusses vom Erzgehalt des eingesetzten Urans ist von besonderer Relevanz, da der Trend der letzten fünf Jahrzehnte ein kontinuierliches

<sup>1</sup> WNA (2009) bei einem Erzgehalt von 0,26

<sup>2</sup> Storm/Smith (2008) bei einem Erzgehalt von 0,013

Sinken des Erzgehaltes zeigt und laut Prognosen der Erzgehalt in Zukunft weiter sinken wird. Gegenwärtig weist ein Drittel der angenommenen Uranressourcen nach Angaben der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) einen Erzgehalt unter 0,03 % auf. Der weltweit durchschnittliche Erzgehalt lag in den letzten fünf Jahrzehnten zwischen 0,05 und 0,15 % (Mudd/Diesendorf 2007b; ISA 2006, S. 96). Der Großteil der globalen Uranvorkommen ist in schwer erschließbaren, so genannten unkonventionellen Ressourcen zu finden. CO<sub>2</sub>-Emissionen, Wasser- und Energiebedarf sowie Kosten des Uranabbaus dürften in der Zukunft also steigen.

In diesem Zusammenhang ist eine weitere entscheidende Frage, wie groß die zeitliche **Reichweite** der Uranressourcen ist. Dazu wurden verschiedene Szenarien über die Entwicklung der KKW-Kapazität definiert (konstante global installierte Reaktorleistung, Anstieg der Kapazität mit 1 % pro Jahr, Ausbau der Kapazität gemäß Annahmen der World Nuclear Association) und den Angaben der IAEA über Uranressourcen verschiedener Erzgehalt-Kategorien gegenübergestellt.

Unter Annahme des niedrigen Wachstumsszenarios der World Nuclear Association (WNA) (mit einer installierten Kraftwerksleistung von 961 GW im Jahr 2050) und Angaben zu Uranressourcen der IAEA liegt die Reichweite der derzeit in Betrieb befindlichen Uranminen im Jahr 2055. Werden auch jene Minen berücksichtigt, die gegenwärtig erst in Entwicklung sind, so reichen die Uranreserven im niedrigen Wachstumsszenario der WNA ca. bis zum Jahr 2075.

Unter Annahme eines lediglich 1%igen Wachstums der nuklearen Kapazität wäre die Reichweite der derzeit in Betrieb befindlichen Uranminen im Szenario „Best Case“ auf den Zeitraum 2052–2065 beschränkt. Bleiben die weltweiten KKW-Kapazitäten konstant, so ist ab dem Jahr 2066 damit zu rechnen, dass die derzeit in Betrieb befindlichen Uranminen ausgeschöpft sind.

Ein Drittel der derzeit in Betrieb befindlichen Uranminen weist einen Erzgehalt unter 0,03 % auf und beinhaltet dadurch auch Uranerz unter dem Grenzerzgehalt. Die energetisch nutzbare Reichweite der Uranressourcen dürfte also noch bedeutend kürzer sein. Werte aus der Literatur bestätigen die relativ kurze Reichweite der Uranressourcen und gehen teilweise sogar von noch niedrigeren Reichweiten aus.

Um auf drohende Versorgungsengpässe zu reagieren, werden **Generation-IV-Reaktoren** entwickelt, die ihren Brennstoff teilweise selbst erbrüten. Die Entwicklung dieser Reaktoren befindet sich allerdings noch in einem frühen Stadium, ist kostenintensiv und mit ungelösten Problemen behaftet, wie etwa Sicherheitsproblemen bei schnellen Brütern und Thoriumreaktoren sowie hohen Kosten für die Entwicklung und den Bau.

## Schlussfolgerungen

Bei neu gebauten Kernkraftwerken wird eine Betriebsdauer von 60 Jahren und eine Vorlaufzeit zwischen Planung und Betrieb einer Anlage von 10 bis 19 Jahren angenommen. Kernkraftwerke, die jetzt geplant werden, würden also im Zeitraum 2080–2090 ans Ende ihrer erwartbaren Nutzungsdauer kommen, jene, die jetzt in Betrieb gehen, im Jahr 2070. Wenn vom niedrigen Wachstumsszenario der WNA ausgegangen wird, würden die derzeit in Betrieb befindlichen bekannten Uranabbaustätten zwischen den Jahren 2043 und 2055 erschöpft sein. Ein Kraftwerk, das jetzt gebaut wird, könnte unter Annahme dieses Szenarios nicht bis zum Ende seiner Nutzungsdauer mit Uran versorgt werden.

Der **Beitrag der Kernkraft für den Klimaschutz** wird unter dem Aspekt der sinkenden Erzgehalte relativiert: Zwar kann die Kernenergie bei hohen Erzgehalten (0,1 bis 2 %) als „low-carbon“ bezeichnet werden. Bei Erzgehalten um 0,01 % steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen allerdings bis auf 210 g CO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> an. Die Emissionen liegen zwar immer noch unter jenen von Kohle oder Öl (600–1200 g/kWh<sub>el</sub>), aber deutlich über jenen von Wind (2,8–7,4 g/kWh<sub>el</sub>), Wasserkraft (17–22 g/kWh<sub>el</sub>) und Photovoltaik (19–59 g/kWh<sub>el</sub>). Darüber hinaus ist der Einsatz von Kernenergie als Mittel zur Verringerung von Treibhausgasen teuer und langsam. Es dauert Jahrzehnte, bis eine Netto-Reduktion der THG eingetreten ist (Pasztor 1991; Findlay 2010). Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Kernenergie sind höher als die jeder anderen möglichen Technologie mit Ausnahme traditioneller Kohlekraftwerke. Windkraftanlagen und KWK-Anlagen sind 1,5 mal so kosteneffektiv bei der Reduktion von CO<sub>2</sub> wie Kernenergie, Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bis zu 10 mal so kosteneffektiv.

Zusätzlich sind noch weitere Probleme der Kernkraft ungelöst:

- Die Gefahr von **Unfällen** mit großer radioaktiver Freisetzung ist auch für die technisch am weitesten entwickelten bzw. derzeit in Entwicklung befindlichen Reaktorkonstruktionen nicht auszuschließen.
- Die **Haftungsfrage** bei Unfällen ist offen. Kernkraftwerke genießen weltweit einzigartige gesetzliche Befreiungen von der Haftung für katastrophale Unfälle.
- Eine **gesundheitliche Gefährdung** durch die Strahlung nuklearer Anlagen kann nicht ausgeschlossen werden. In Deutschland konnte eine Studie des Deutschen Kinderkrebsregisters bei Kindern erhöhte Leukämieraten in der Umgebung von Kernkraftwerken nachweisen (Kaatsch et al. 2007).
- Während die Reichweite der bekannten Uranressourcen auf dieses Jahrhundert begrenzt ist, muss der hochradioaktive Abfall über tausende Jahre sicher gelagert werden. Ein **Lagerkonzept** für 245.000 Tonnen an weltweit bislang angefallenen abgebrannten Brennelementen aus der Kernenergieproduktion liegt noch nicht vor.
- Die kommerzielle Kernkraft ist die größte treibende Kraft hinter der Verbreitung spaltfähigen Materials (**Proliferation**). Ohne die kommerzielle Kernkraft könnten Proliferationsversuche eindeutig identifiziert werden, weil jeder Versuch, spaltbares Material anzuschaffen, nur militärischen Zwecken dienen würde.

- **Kernenergie führt zu höheren Strompreisen**, denn direkte und indirekte Subventionen verdecken die enormen Kosten der Kernenergie. Weltweit gibt es keinen einzigen Reaktor, bei dessen Bau das finanzielle Risiko einzig von privaten AkteurInnen getragen wurde. Wenn die Kernenergie in einem liberalisierten Markt tatsächlich zu niedrigen Strompreisen führte, gäbe es keine Probleme, neue Reaktoren privat zu finanzieren.

Die Kernenergie gilt aufgrund der damit verbundenen Gefahren als Hochrisiko-Energietechnologie. In Bezug auf die Klimaschutzthematik wird dieser Energieerzeugungsform allerdings auch das Prädikat „CO<sub>2</sub>-arm“ zugeordnet.

Während Kernenergie bei hohen Erzgehalten des benötigten Rohstoffs Uran durchaus niedrigere Treibhausgasemissionen als Kohle und Öl aufweist, ist die Reichweite der hochwertigen Uranvorkommen beschränkt und Uran als Rohstoff generell – wie fossile Rohstoffe – endlich. Da von einem in der Zukunft sinkenden Erzgehalt der verfügbaren Vorkommen auszugehen ist, können die **CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kernenergie** auf bis zu **210 CO<sub>2</sub>/kWh<sub>eI</sub>** ansteigen.

## 2 Uranressourcen

Die Studie „Energiebilanz der Nuklearindustrie“ wurde durch eine Zusatzförderung der Wiener Umweltanwaltschaft um das Thema Uranressourcen erweitert, welches im Folgenden präsentiert wird.

Die Nuklearindustrie ist in ihrer jetzigen technologischen Entwicklung auf Uran als Kernbrennstoff angewiesen. Doch Uran ist ähnlich wie Erdöl ein nicht erneuerbarer Rohstoff, seine Verfügbarkeit wird also zwangsläufig an Grenzen stoßen. Wie lange die Uranreserven den Kernkraftwerken als Brennstoff zur Verfügung stehen werden, ist für energiepolitische Entscheidungen wesentlich.

In diesem Zusammenhang sollen folgende Fragen behandelt werden:

- Welche Arten von Uranressourcen gibt es und wie hoch sind sie?
- Wie lange werden die Uranressourcen unter Zugrundelegung verschiedener Szenarien der Entwicklung des weltweiten Kernkraftwerksparks als Brennstoff zur Verfügung stehen? Angabe aus der Literatur und Ergebnisse der vorliegenden Studie werden zusammengefasst.
- Welchen Einfluss haben Änderungen in der Abbautiefe und im Erzgehalt auf die Energiebilanz?
- Welche Möglichkeiten bietet Thorium als mögliche alternative Energiequelle?

### 2.1 Grundlagen

Natürlich vorkommendes Uran ist ein radioaktives metallisches Element. Es wurde 1789 erstmals aus dem Mineral Pechblende isoliert – seine Radioaktivität wurde 1896 von Henri Becquerel entdeckt.

Uran ist in seinem natürlichen geologischen Vorkommen eine Mischung aus vier Isotopen<sup>3</sup> – U-238, U-235, U-234 und Spuren von U-236. U-238 macht mit 99,27 % bei weitem den größten Anteil der Isotope aus. U-235 kommt zu nur 0,72 % in natürlichem Uran vor. Die Halbwertszeit von U-238 liegt bei ca. 2,5 - 4,5 Mrd. Jahren, jene von U-235 bei „nur“ 713 Millionen Jahren. Der im Verhältnis zu U-238 schnellere Zerfall von U-235 begründet den niedrigen U-235 Anteil im Natururan.

**U-235** ist das wichtigste natürlich vorkommende spaltbare Element, das zu einer Kernspaltungskettenreaktion fähig ist. Von einem Kilogramm Uran stehen allerdings lediglich 7,2 g an Uran zur Spaltung zur Verfügung. Um in einem Kernreaktor verwendbar zu sein, ist deshalb zumeist eine energieintensive Anreicherung des Urans zugunsten des Isotops U-235 nötig. Andere spaltbare Elemente können nur aus natürlich vorkommenden Elementen erzeugt werden: Durch Neutronenaktivierung entsteht aus U-238 über mehrere Schritte das

---

<sup>3</sup> Isotop = Elemente mit gleicher Anzahl an Protonen, aber unterschiedlicher Anzahl an Neutronen – was in unterschiedlichem Gewicht, chemisch annähernd gleichen, aber kernphysikalisch unterschiedlichen Eigenschaften resultiert

spaltbare Plutonium-239. Dieses giftige radioaktive Schwermetall kann zur Produktion von Kernwaffen verwendet werden.

Außerdem kann Thorium-232 durch Neutronenbeschuss in das spaltbare U-233 umgewandelt werden.

Alle Isotope des Urans zerfallen mit einer konstanten Zerfallsrate und unterschiedlichen Halbwertszeiten in andere Elemente und setzen dabei **radioaktive Strahlung** frei. Dadurch stellt Uran eine der Hauptwärmequellen im Erdinneren dar, welche Konvektion und Kontinentaldrift vorantreiben (Arnold et al. 2010). Die natürlichen Isotope unterliegen vornehmlich dem  $\alpha$ -Zerfall, der Anteil an  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung ist eher gering. Die Gesamtaktivität von reinem Uran, bestehend aus den drei natürlichen Isotopen, beträgt 25 Bq per mg. (Arnold et al. 2010)

Beim **Uranabbau** stellt diese Strahlung eine potentielle Umwelt- und Gesundheitsgefährdung dar, welche durch strenge Vorschriften geregelt werden muss. Radon, ein Zerfallsprodukt des Urans, kann sich bei ungenügender Ventilation in Uranminen ansammeln und zu einer Erhöhung des Lungenkrebsrisikos speziell für Bergleute führen.

## 2.2 Kategorisierung der Uranressourcen lt. OECD/NEA (2010)

Uran kommt in geologischen Anreicherungen in der Erdkruste (Uran-Lagerstätten) und durch Sedimentation auch im Meer vor. Nur wenige Länder verfügen über den Großteil der Vorräte, insbesondere von zu niedrigen Kosten abbaubaren Vorräten (siehe Abbildung 5).

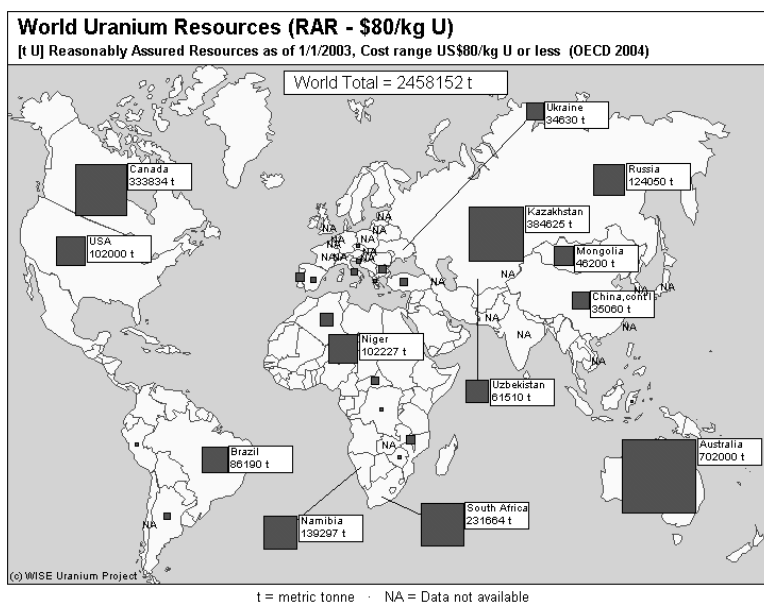


Abbildung 5: Welturanressourcen (Diehl 2006)

Die **Höhe dieser Ressourcen** ist eine oft heftig diskutierte Frage. Als nötige Grundlage für diese Diskussion wird im Folgenden die gängigste Art Uranressourcen zu kategorisieren beschrieben.

Die weltweit am meisten verwendete Schätzung der Uranressourcen ist die des sogenannten „Red Books“, welches von der Nuclear Energy Agency (NEA – zu OECD gehörend) in regelmäßigen Abständen herausgegeben wird.

Die von der IAEA und die in der aktuellsten Version des Red Books (OECD/NEA 2010) verwendete Art der Klassifikation kategorisiert Uranressourcen sukzessive anhand folgender Kriterien:

- Konventionelle/nicht konventionelle Ressourcen
- Vertrauensgrad, der den Daten über die Ressourcen zugeschrieben wird
- Kosten des Abbaus

### 2.2.1 Konventionelle Ressourcen

Von konventionellen Ressourcen spricht man, wenn Uran das Haupt-, Co- oder Haupt-Nebenprodukt gängiger Abbaumethoden ist. Zurzeit ist der Abbau nur aus konventionellen Uranressourcen rentabel.

Konventionelle Ressourcen werden nach dem Vertrauensgrad, mit dem man ihr Vorkommen kennt, weiter in zwei Haupt- mit jeweils zwei Nebenkategorien unterteilt (OECD/NEA 2010; Arnold et al. 2010):

#### **A: Identified Resources**

„Reasonably Assured“ – und „Inferred Resources“ in Summe werden als „Identified Resources“ bezeichnet. Diese lassen sich einer bestimmten Lagerstätte/Region zuordnen und werden im Allgemeinen als **Basis für Ressourcenabschätzungen** verwendet.

##### A.1 Reasonably Assured Resources (RAR)

„Reasonably Assured Resources“ definieren jene Mengen an Uran, die in Lagerstätten bestimmter Größe und mit definiertem Urangehalt enthalten sind. Ihr Abbau ist in gegebenen Kostenspannen und mit erprobten Abbau- und Verarbeitungsmethoden möglich. Die hohe Sicherheit ihrer Existenz basiert auf Probenahmen und diversen Messungen.

Im Deutschen wird oft auch der Begriff „**Reserven**“ verwendet.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, definiert Reserven als „Teil des Gesamtpotenzials, der mit großer Genauigkeit erfasst wurde und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden kann.“ (WEG 2008)

Reserven sind also ein Teil der Gesamtressourcen und entsprechen den zurzeit **wirtschaftlich abbaubaren RAR**. Zur Vereinheitlichung wird in diesem Text durchgehend von Ressourcen die Rede sein.

##### A.2 Inferred Resources (IR)

Unter *Inferred Resources* versteht man solche Ressourcen, deren Vorhandensein aus direkten geologischen Beweisen abgeleitet wird, wobei die Vermessung der Lagerstätte und das Wissen über das Vorkommen aber noch nicht so weit fortgeschritten sind, um sie als

RAR einzustufen zu können. Die Abschätzung der Menge und Konzentration des Urans ist hier also weniger zuverlässig.

### **B. Undiscovered Resources**

„Prognosticated Resources“ und „Speculative Resources“ werden unter dem Begriff „Undiscovered Resources“ (unentdeckte Ressourcen) zusammengefasst. Sie beinhalten Ressourcen, die in „Uran-Gegenden“ noch erwartet werden beziehungsweise solche, die man in Regionen mit ähnlichen geologischen Gegebenheiten wie die der bekannten Lagerstätten vermutet. Die „Undiscovered Resources“ sind hochspekulativ und können deshalb in Verfügbarkeitsprognosen nicht inkludiert werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie nie gefunden werden, ist wesentlich höher als die Wahrscheinlichkeit, dass sie als Uranreserven genutzt werden können (EWG 2006, S. 6).

Sie haben aufgrund ihrer Unbestimmtheit zum Zeitpunkt der in Verfügbarkeitsprognosen gewöhnlich nicht einbezogen bzw. getrennt angegeben.

### **C. Kosten des Abbaus**

Die **Kosten des Abbaus** werden an sich in folgende Kosten-Klassen unterteilt:

- niedrige Kosten-Klasse (bis 40 US-\$/kg U)
- mittlere Kosten-Klasse (bis 80 US-\$/kg U)
- hohe Kosten-Klasse (bis 130 US-\$/kg U)
- sehr hohe Kosten (bis 260 US-\$/kg U)

Bisher werden Vorräte, deren Abbaukosten 260 US-\$ übersteigen, als unwirtschaftlich im Abbau angesehen und werden nicht in die Berechnung der (konventionellen) Ressourcen eingebracht. Die Wirtschaftlichkeit des Uranabbaus wird an sich durch die Höhe des Uranpreises beeinflusst, welcher – wie die anderen auf dem Markt gehandelten Güter – von Angebot und Nachfrage bestimmt wird. (Arnold et al. 2010)

#### **2.2.2 Unkonventionelle Ressourcen**

Unkonventionelle Ressourcen enthalten im Gegensatz zu konventionellen Ressourcen Uran nur in sehr geringen Konzentrationen, oder Uran wird aus ihnen als unwesentliches Nebenprodukt gewonnen. Beispiele hierfür sind Uran im Meerwasser und in Phosphatlagerstätten.

## 2.3 Höhe der Uranressourcen

### 2.3.1 Red Book (OECD/NEA 2010)

#### 2.3.1.1 Konventionelle Uranressourcen

Die **Höhe der Identified Resources** beträgt laut Red Book (OECD/NEA 2010, S. 10) per 1 Jan 2009 ca:

- 5.404.000 tU in der Kategorie < USD 130/kg (hohe Kosten)
- 6.306.300 tU in der Kategorie < USD 260/kg U (sehr hohe Kosten)

Figure 2. Distribution of Reasonably Assured Resources (RAR) among countries with major resources

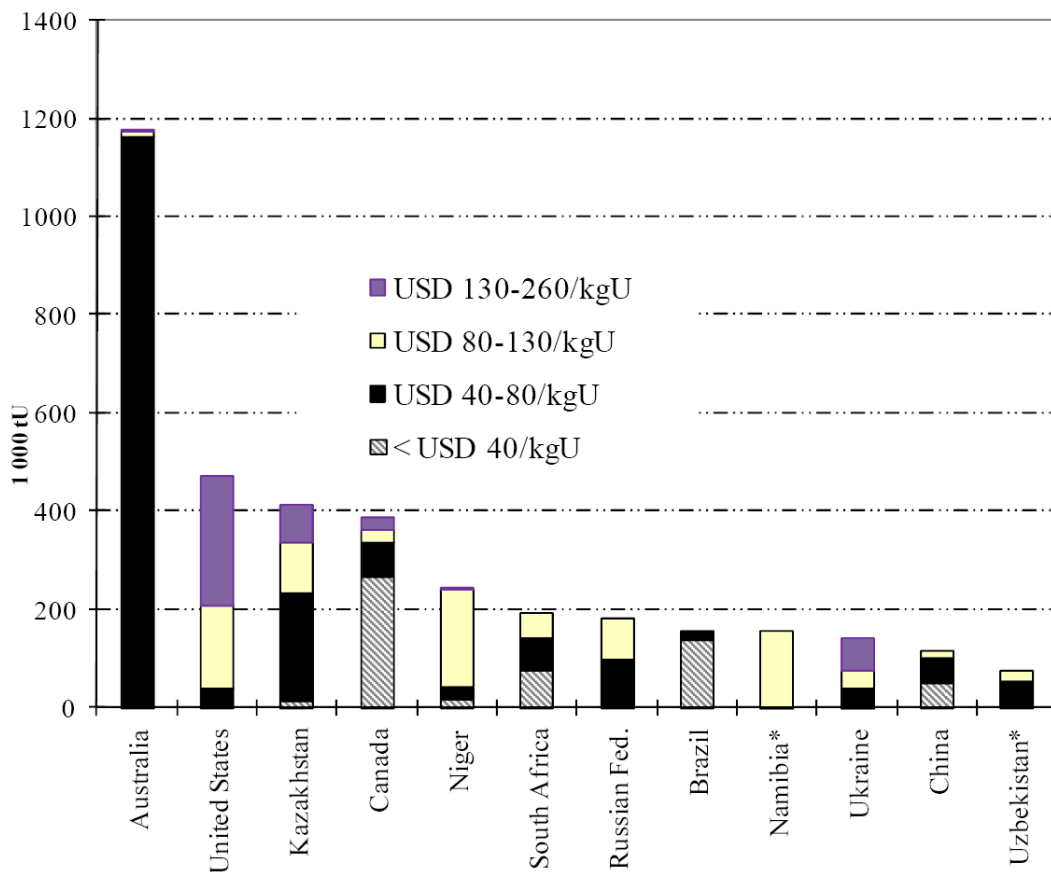


Abbildung 6: Verteilung der „Reasonably Assured Resources“ (OECD/NEA 2010, S. 24)

Die **Undiscovered Resources** machen laut Red Book 2009 in Summe 10.400.000 tU (OECD/NEA 2010, S. 27).

Obwohl die Daten zu Uranreserven des **Red Book** international verwendet werden, ist die Qualität der zur Verfügung gestellten Daten aufgrund der verwendeten Datenquelle allerdings zweifelhaft. Die Daten im Red Book wurden durch eine Sammlung von Antworten

auf Fragebögen zu nationalen Uranressourcen zusammengetragen, die die NEA an OECD-Mitgliedsstaaten bzw. die IAEA an Nicht-OECD-Mitgliedstaaten gesendet hatte. Die Fragebögen wurden damit größtenteils von Regierungsorganisationen ausgefüllt und basieren auf nationalen Einschätzungen statt geologischen Untersuchungen. Da die Fragebögen einen bestimmten Interpretationsspielraum zulassen, ist die Objektivität und Korrektheit der Daten des Red Book nicht gesichert (Dittmar 2009 c).

**Figure 3. Distribution of Inferred Resources among countries with major resources**

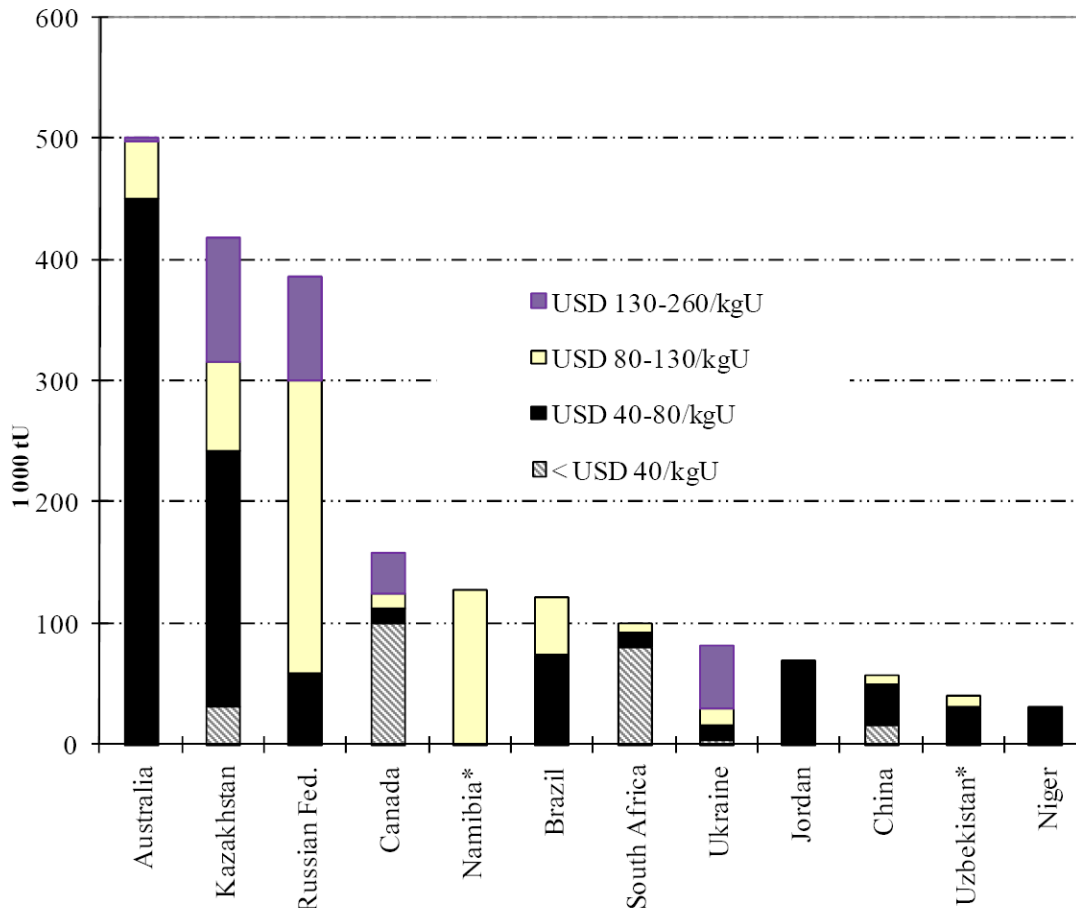


Abbildung 7: Verteilung der „Inferred Resources“ (OECD/NEA 2010)

EWG (2006) gibt an, dass lediglich „Reasonably Assured Resources“ (RAR) unter 40 \$/kgU bzw. unter 80 \$/kg Uran vergleichbar mit den nachgewiesenen Ölreserven sind. RAR höherer Kostenkategorien und „Inferred Resources“ haben den Status von wahrscheinlichen bzw. möglichen Ressourcen. *Undiscovered Resources* sind hochspekulativ und können in Zukunftsprognosen nicht miteinbezogen werden.

Für die Daten des Red Book heißt das, dass lediglich **2.516.000 tU** (RAR < USD 80/kg) in die Berechnungen aufgenommen werden sollten. RAR bis USD 260/kgU (zusätzlich 1.488.000 tU) gelten als wahrscheinliche, weitere 2.303.000 tU als mögliche Ressourcen.

### 2.3.1.2 Unkonventionelle Uranressourcen

Durch unkonventionelle Ressourcen steht theoretisch noch mehr Uran zur Verfügung – der Abbau ist zur Zeit aber nicht rentabel. Die Schätzungen betreffend die Höhe der unkonventionellen Ressourcen gehen allerdings weit auseinander, von 7.000.000 bis 22.000.000 tU (OECD/NEA 2010, S. 32).

Besonders im Meer befinden sich trotz niedriger Konzentration (ca. 3-4 ppb<sup>4</sup>) große Uranressourcen. Wenn man diese wirtschaftlich erschließen könnte, hätte man für lange Zeit Uran zur Verfügung. Allerdings müssen dafür enorme Mengen an **Meerwasser** bewegt werden: 350.000 t für die Produktion von 1 kg Uran (OECD/NEA 2010). Für die Uranmenge, die für die Produktion einer Tonne Brennstoffs nötig ist, müssten ca. 2 km<sup>3</sup> Meerwasser umgesetzt werden, das entspricht etwa 400 km<sup>3</sup> für den Betrieb eines Reaktors für die Dauer eines Jahres. Die nur für die Uranproduktion nötige Energie würde den daraus möglichen Energieoutput eines Reaktors überschreiten (Fleming 2007).

Auch die IAEA steht der Urangewinnung aus Meerwasser skeptisch gegenüber: Sie sagt, dass die Forschung zur Uranextraktion aus Meerwasser zwar fortgesetzt werden wird, aber lediglich zur Stillung der Wissbegier, weil sie zum aktuellen Preis für die potentielle ökonomische Verwertung unbedeutend ist (IAEA 2001).

Eine weitere unkonventionelle Uranquelle sind **Phosphate**. Allerdings ist die Urankonzentration in Phosphaten sehr gering und der Gewinnungsprozess schwierig (Fleming 2007). „Die Gewinnung von Uran aus Phosphaten wurde in der Vergangenheit schon in verschiedenen Ländern – vornehmlich als Nebenprodukt der Düngerherstellung – durchgeführt, wurde aber gegen Ende der 1990-er Jahre wieder eingestellt. Grundsätzlich finden sich große Mengen an Uran weltweit in den Phosphatlagerstätten, allerdings sind diese von sehr geringer Konzentration (0,06–0,0006 %). Die Abschätzungen bezüglich der tatsächlich förderbaren Mengen liegen nicht im nötigen Umfang vor. Daher ist eine Einteilung in die üblichen Ressourcenklassen nicht möglich. Frühe Ausgaben des Redbook weisen rund 85 % dieser Ressourcen Marokko zu (7,3–7,6 Mio. tU). Wiederum andere Schätzungen sehen 9 Mio. Tonnen U in den Ländern Jordanien, Mexico, Marokko und in den USA. Andere Quellen sprechen von 22 Millionen Tonnen U weltweit“ (Arnold et al. 2010).

Und weiter: „In Anbetracht der Menge an Ressourcen ist es nicht auszuschließen, dass auch die Urangewinnung aus Phosphaten ihren Beitrag zur weltweiten Uranproduktion leisten können. Dies ist jedoch einerseits vom Bedarf an Phosphatdünger und andererseits vom Uranpreis abhängig. Erst bei Preisen von etwa 300 US-\$/kg könnte diese Art der Urangewinnung in größerem Maße wettbewerbsfähig werden. Jedoch sieht selbst die IAEA-Publikation „Analysis of Uranium Supply to 2050“ in der Urangewinnung aus Phosphaten nicht mehr Potential als 3.700 tU/Jahr, gemessen am derzeitigen Weltbedarf von rund 69.000 Tonnen U pro Jahr und vor allem bei einem ebenfalls durch die IAEA prognostizierten und gewünschten Ausbau der Kernenergie ein geringer Beitrag“ (ebd.).

Aufgrund der geringen Erzgehalte unkonventioneller Ressourcen ist es fraglich, ob der Abbau energetisch prinzipiell sinnvoll sein kann: Die vorliegende Studie berechnet

---

<sup>4</sup> ppb = part per billion = 0,001 g/t

**Grenzerzgehalte** von ca. 0,008–0,012 % - der Betrieb von Kernkraftwerken mit Uran aus Vorkommen mit dieser oder schlechterer Qualität würde über den Lebenszyklus mehr Energie benötigen als im Betrieb erzeugt wird. Phosphate mit Konzentrationen von 0,06–0,0006 % würden zum Teil weit unter diesem energetischen Schwellenwert liegen.

### 2.3.2 IAEA-Datenbank

Für die Berechnungen der Reichweite der Uranressourcen, die in der vorliegenden Studie durchgeführt wurden, wurde eine Datenbank der IAEA<sup>5</sup> über Uranressourcen als Basis verwendet, die eine Zuordnung der Uranressourcen nach Erzgehalt erlaubt: In dieser Datenbank liegen Minimal- und Maximaluranvorkommen der derzeit bekannten Uranlagerstätten, gruppiert nach Art des Vorkommens, Status und Erzgehaltskategorie vor.

Von diesen Lagerstätten wurden folgende Datensätze ausgeschlossen:

- Art des Vorkommens: Phosphorite und Black Shales (da unkonventionelle Uranreserven);
- Status: Closed, Depleted, Dormant, Reclaimed.

Nach verschiedenen Umgruppierungen wurde die Aufstellung der Uranressourcen vs. Erzgehalt als Basis der Berechnungen des EBN-Modells verwendet. Dabei ist zu beachten, dass Uranressourcen mit einem Erzgehalt unter 0,03 % laut der Ergebnisse der vorliegenden Studie nur zum Teil zum Betrieb von Kernkraftwerken verwendet werden können: Ab einem Erzgehalt von 0,02 % nimmt der erzielbare Energieüberschuss wegen des hohen Energieaufwands im Uranabbau stark ab – ab dem Grenzerzgehalt von ca. 0,008 – 0,012 % wird die Energiebilanz negativ. Das heißt, Uranressourcen dieses Erzgehaltes können zwar unter Umständen noch mit monetärem Gewinn verwendet werden, aber ohne Energiegewinn.

Die Uranressourcen mit einem Erzgehalt von unter 0,03 % machen ungefähr ein Drittel der angegebenen Ressourcen aus. Die angegebenen Reichweiten der Uranressourcen beinhalten diese Ressourcen in ihrer Gesamtheit – also auch Uranressourcen unter dem Grenzerzgehalt. Ein Ausschluss der Uranressourcen unter dem Grenzerzgehalt war aufgrund mangelnder Erzgehalt vs. Uranressourcen Beziehung nicht möglich.

Tabelle 2: Uranressourcen – Basis für Berechnungen des EBN-Modells

Uranium Ressources [kt U]	< 0,03 % U	0,03 – 0,05 % U	0,05 – 0,10 % U	0,10 – 0,20 % U
Operationable	2.217,50 - 2.340,00	427,50 - 575,00	313,00 - 672,50	392,75 - 661,00
Exploration & Development	207,50 - 437,00	255,00 - 536,00	364,50 - 687,00	756,75 - 1.043,33
Unknown	62,50 - 130,50	34,00 - 69,00	40,00 - 95,50	6,00 - 12,50
<b>Total</b>	<b>2.487,50 - 2.907,50</b>	<b>716,50 - 1.180,00</b>	<b>717,50 - 1.455,00</b>	<b>1.155,50 - 1.716,83</b>
Uranium Ressources [kt U]	0,20 – 0,50 % U	0,50 - 1,00 % U	1,00 - 5,00 % U	> 5,00 % U
Operationable	146,25 - 322,50	8,75 - 17,50	6,25 - 12,50	270,00 - 270,00
Exploration & Development	141,75 - 314,33	19,50 - 45,83	17,50 - 40,00	132,50 - 135,00
Unknown	5,00 - 10,00	,50 - 1,00	-	-
<b>Total</b>	<b>293,00 - 646,83</b>	<b>28,75 - 64,33</b>	<b>23,75 - 52,50</b>	<b>402,50 - 405,00</b>

<sup>5</sup> Datenquelle: <http://www-nfcis.iaea.org/UDEPO/UDEPOMain.asp>

## 2.4 Entwicklungsszenarien des KKW-Parks und Uranbedarf

### 2.4.1 Szenarien aus der Literatur

2008 befanden sich 438 Reaktoren mit einer Nettokapazität von 373 GW<sub>el</sub> am Netz. Der Betrieb dieser Reaktorflotte benötigt 59 065 tU pro Jahr (OECD/NEA 2010, S. 11). 2010 sind es 441 Reaktoren mit einer Nettokapazität von 372,7 GW<sub>el</sub>. 60 Reaktoren befinden sich in Bau (IAEA PRIS 2010).

Aufgrund der erheblichen Bauprogramme in China Indien und der Republik Korea kann sich die Anzahl der Kernreaktoren in den nächsten 15 Jahren allerdings erhöhen. Wie stark sich die Anzahl der Reaktoren wirklich verändert hängt von verschiedensten Faktoren wie der gleichzeitigen Schließung von Reaktoren und anderer limitierender Faktoren ab. Im Folgenden soll der Uranbedarf unter verschiedenen **Entwicklungsszenarien des Kernkraftwerksparks** betrachtet werden:

OECD/NEA (2010) geht von 2 Entwicklungsszenarien bis zum Jahr 2035 aus:

- Im „**Low Scenario**“ steigt die Kapazität „lediglich“ um 37 % auf 511 GW<sub>el</sub>.
- Im „**High Scenario**“ wird in 2035 von einer Steigerung von 110 % gegenüber 2009 ausgegangen, was eine Nettokapazität von 782 GW<sub>el</sub> ergibt.

Im Energy Outlook der IEA, der im November 2011 veröffentlicht werden soll, wird als Konsequenz des Unfalls von Fukushima auch ein „**lower nuclear case**“ berücksichtigt, der eine zusätzliche nukleare Kapazität bis 2035 von nur mehr 180 GW vorsieht. Nach Angaben des Chefökonom der IEA, Fatih Birol, ist 60–70 % des Kapazitätenanstiegs in Nicht-OECD-Staaten (insbesondere China, Indien und Russland) zu erwarten.<sup>6</sup>

Die World Nuclear Association (WNA 2010) geht von wesentlich höheren Werten aus; dies würde

- 2030 einen 1,6–3,6 fachen Uranbedarf gegenüber heutigen Werten und
- 2100 sogar einen um 5,5–29,6 fachen (!) Uranbedarf bedeuten.

Prognos (2009) erwartet hingegen sogar einen Rückgang der installierten Kapazität. Tabelle 3 zeigt mögliche Entwicklungen des Kernkraftwerksparks.

---

<sup>6</sup> Financial Times Online, „IEA: The world needs nuclear,“ 11. Mai 2011, <http://blogs.ft.com/energy-source/2011/05/11/iea-the-world-needs-nuclear/#>

Tabelle 3: Entwicklungsszenarien installierter nuklearer Leistung und des Uranbedarfs

<i>Studie</i>	<i>Bezugsjahr</i>	<i>Low scenario [GW<sub>el</sub> weltweit]</i>	<i>Bezugsjahr</i>	<i>High scenario [GW<sub>el</sub> weltweit]</i>
WNA (2010)	2030	602	2030	1.339
IAEA (2008)	2030	473	2030	748
OECD/NEA (2010)	2035	511	2035	782
PROGNOS (2009)	2030	309	2030	
WNA (2010)	2060	1.140	2060	3.688
WNA (2010)	2100	2.062	2100	11.046

#### 2.4.2 Szenarien im EBN-Modell

Zur Berechnung der Entwicklung des jährlichen Brennstoffverbrauchs wurden 4 Szenarien für die Entwicklung der global installierten Kernkraftwerksleistung ausgewählt. Diese Szenarien sind:

- Constant capacity: konstante global installierte Reaktorleistung von 2006 bis 2100
- 1%-Growth: Anstieg der Kapazität mit 1 % pro Jahr
- WNA-low: Ausbau der Kapazität gemäß dem WNA-low-Szenario (WNA 2010)
- WNA-high: Ausbau der Kapazität gemäß dem WNA-high-Szenario (WNA 2010)

Die Ermittlung des Natururanverbrauchs erfolgte unter Verwendung des Modells zur Berechnung der Energieintensität unter Verwendung der Reaktorparameter sowie der Anteile der Minentypen der Szenarien „Best Case“, „Average“, „Worst Case“ und „Future“.

## 2.5 Reichweite der Ressourcen

### 2.5.1 Angaben der Literatur

#### Red Book (OECD/NEA 2010)

Unter Annahme eines Uranbedarfs von 59.065 tU im Jahr 2008 würden die Uranressourcen laut Red Book unter Verwendung der gesamten „*Identified Resources*“ < USD 260/kgU knapp über 100 Jahre lang halten (6.306.300 tU /59.065 t/a =106 Jahren Reichweite) (OECD/NEA 2010, S. 106).

Diese Schätzung ist optimistisch und basiert nicht nur auf sicheren Reserven (RAR < 80 kg/U), sondern auch auf wahrscheinlich ökonomisch abbaubaren (RAR > \$ 80/kgU) und möglichen (inferred) Ressourcen (EWG 2006). Würde als konservative Annahme lediglich RAR < 80 kg/U in die Berechnung mit berücksichtigt, würde dies eine **Reichweite** von 2.516.000 t bedeuten, was unter Annahme des jetzigen Uranbedarfs (59.065 t/a) eine Reichweite von **43 Jahren** ergibt. Die tatsächliche Reichweite wird zwischen 43 und 106 Jahren als Maximum (für den Fall, dass alle „Inferred Resources“ extrahiert werden können) liegen.

Unter Ausdehnung auf die gesamten konventionellen Ressourcen wären die Ressourcen laut Red Book beim jetzigen Uranbedarf sogar mehr als 300 Jahre ausreichend. Dies würde allerdings „Speculative Resources“ mit einbeziehen, deren Nicht-Entdeckung wahrscheinlicher ist als deren Entdeckung (EWG 2006).

Das Red Book gibt an, dass das Abdecken des High Case Scenarios bis 2035 weniger als die Hälfte der „Identified Resources“ benötigt (OECD/NEA 2010, S. 13).

Für die Abdeckung des Low Case Wachstumsszenarios bis 2035 würden ca. 40 % der Identified Resources ausreichen.

Eine vereinfachte Rechnung zeigt, wie sich, falls diese Angaben korrekt sind, die Uranreichweite weiter verhalten würde:

- Low Case Scenario von OECD/NEA (2010)
  - 2035 stehen laut Red Book noch ca. 50 % = 3.153.150 t der Identified Resources zur Verfügung
  - Sogar wenn die von der OECD/NEA (2010) angenommene installierte Leistung von 511 GW<sub>el</sub> ab 2035 nicht mehr steigen würde, bräuchte dies 80.917 t Uran pro Jahr ab 2035
  - Die **Identified Resources** würden in diesem Szenario also bis **2074** halten
- High Case Scenario von OECD/NEA (2010)
  - 2035 stehen laut Red Book 2009 noch 40 % = 2.522.520,00 t der Identified Resources zur Verfügung
  - Bei einer konstanten jährlichen installierten Leistung von 782 GW<sub>el</sub> bedarf dies 123.831 t Uran pro Jahr

- Die jetzigen **Identified Resources** würden also bis **2055** ausreichen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Uranressourcen, die jetzt noch als „undiscovered“ eingestuft werden, die Höhe der „*Identified Resources*“ erhöhen werden.

### **Dittmar (2009c)**

Eine Berechnung von Dittmar (2009c, S. 8), der die gesamten konventionellen Ressourcen berücksichtigt, ergibt einen pessimistischeren Ausblick. Dittmar kommt für **konventionelle Uranressourcen** des Red Book 2007 zu folgendem Schluss:

#### ■ Minimal-Wachstumsszenario

- Reichweite bis 2071
- Annahme für die vereinfachte Berechnung: kontinuierliches Wachstum auf 509 GWel bis 2030, danach kein Wachstum mehr

#### ■ Maximal-Wachstumsszenario

- Reichweite bis 2060
- Annahme für die vereinfachte Berechnung: kontinuierliches Wachstum auf 663 GWel bis 2030, danach kein Wachstum mehr

Reaktoren, die in den Jahren 2020–2030 gebaut werden, werden also aufgrund von Mangel an Uran ihre Nutzungsdauer von 60 Jahren nicht erreichen können.

Bezüglich unkonventioneller Ressourcen gibt das Red Book an, dass große Anstrengungen und Investitionen nötig wären, um diese Ressourcenquelle nutzen zu können (OECD/NEA 2010 S. 106).

### **Generation IV International Forum**

In einem von der U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee und dem Generation IV International Forum herausgegebenen Paper wird davon ausgegangen, dass in 50 Jahren die Ressourcenverfügbarkeit ein limitierender Faktor wird, sofern nicht Durchbrüche in neuen Extraktionstechnologien gemacht werden (US DOE/GIF 2002). Abbildung 8 zeigt das Verhältnis von bekannten und vermuteten Uranressourcen im Verhältnis zum Uranbedarf (Linie LWR = Light Water Reactor once-through). Laut dieser Grafik werden bereits **2030** die bekannten **Ressourcen erschöpft** sein.

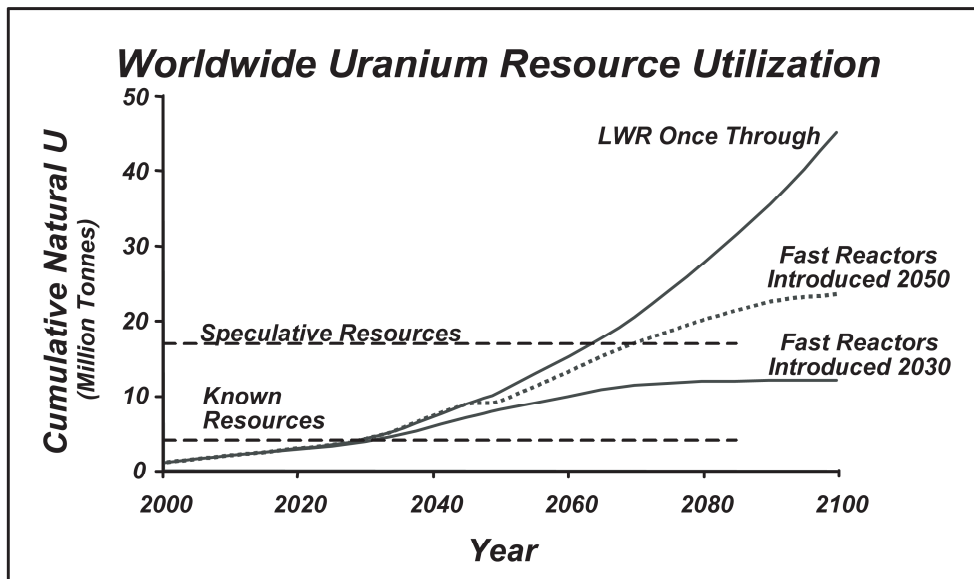


Abbildung 8: Uranreserven vs. Uranbedarf (US DOE/GIF 2002)

**Diehl (2005, 2006)**

Laut Berechnungen des Wise Uranium Projects (Diehl 2005) werden den bekannten Uranreserven ca. 2042 nicht mehr den Bedarf decken können. Abbildung 9 zeigt außerdem das Sinken der sekundären Uranquellen ab 2013. Laut (Diehl 2006) ist mit dem Fund großer/reicher Lagerstätten nicht zu rechnen. Viel wahrscheinlicher ist das Auffinden kleiner Lagerstätten mit niedrigen Erzgehalten und höheren spezifischen Explorationskosten.

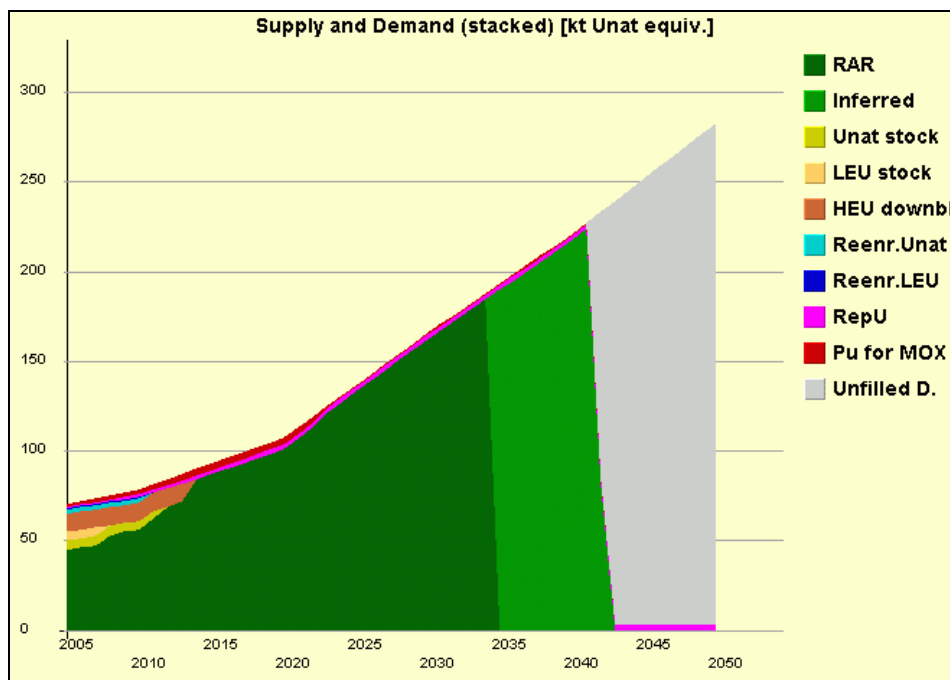


Abbildung 9: Uranbereitstellung vs. Uranbedarf (Diehl 2005)

## 2.5.2 Einfluss von Erzgehalt/Abbautiefe

Energie- und Wasserbedarf sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen des Uranabbaus zeigen eine starke Sensitivität hinsichtlich Erzgehalt und Abbautiefe. Da der Erzgehalt bereits jetzt im Mittel kontinuierlich sinkt und Abbautiefen zukünftiger Minen höchstwahrscheinlich tiefer liegen werden, ist also mit einem Anstieg des Energiebedarfs im Uranabbau zu rechnen (Mudd/Diesendorf 2007b). Deshalb wurde in der vorliegenden Studie dem Uranabbau und der Untersuchung der Sensitivität der Energieintensität auf den Erzgehalt besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Der durchschnittliche Uranerzgehalt in der Erdkruste beträgt 1,4 ppm (1,4 g/t). Uran ist weltweit betrachtet allerdings nicht homogen verteilt: höhere Konzentrationen haben sich in Form von Lagerstätten gesammelt. Der **Uranerzgehalt** in den verschiedenen Lagerstätten kann stark variieren. Zurzeit abbauwürdige Konzentrationen beginnen in etwa bei 0,03 % und erreichen 3–7 % in den hochwertigen Uranerzlagerstätten. Der durchschnittliche Erzgehalt lag in den letzten 5 Jahrzehnten **weltweit** im Mittel zwischen **ca. 0,05 und 0,15 %** (Mudd/Diesendorf 2007b; ISA 2006, S. 96).

Bezüglich der mengenmäßigen **Verteilung** zeigt es sich, dass die Lagerstätten mit hoher Konzentration einen geringen Anteil ausmachen, während der Großteil der globalen Uranvorkommen in den schwer erschließbaren, so genannten unkonventionellen Ressourcen (unter 100 ppm U) zu finden sind (Arnold et al. 2010). Lediglich Kanada besitzt bedeutende Uranvorkommen mit einem Erzgehalt über 1 % (bis zu 23 % U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Ca. 90 % der weltweiten Uranressourcen haben einen Erzgehalt unter 1 %, 2/3 einen Erzgehalt unter 0,2 %. Australien hat bei weitem die größten Uranressourcen, jedoch haben 90 % einen Erzgehalt von unter als 0,06 %. Auch in Kasachstan liegt der Großteil der Ressourcen in Vorkommen mit einer Urankonzentration von weit unter 0,1 % vor (EWG 2006).

Lagerstätten mit einem **Erzgehalt von unter 0,1 %** können derzeit nur bei Vorliegen besonderer Umstände wirtschaftlich abgebaut werden, wie z.B. der Möglichkeit In-Situ Leaching anzuwenden, einem riesigen Obertageabbau wie in Rössing/Namibia oder Uranabbau als Nebenprodukt wie in Olympic Dam in Australien (Diehl 2006).

Es gibt also wesentlich mehr Uranressourcen mit niedrigem Erzgehalt:

- Eine Reduktion des Erzgehaltes um den Faktor 10 ergibt laut Deffeyes and Mac Gregor eine Erhöhung der extrahierbaren Uranmenge um den Faktor 300 (Deffeyes/MacGregor 1980 aus Dittmar 2009c):
- Es sollte also 300 Mal mehr Uran mit einem Erzgehalt von 0,01 % geben als Uran mit einem Erzgehalt von 0,1 %. Einzig nötig für diesen Anstieg wäre ein höherer Uranpreis.

Dittmar (2009 c) führt als Gegenbeweis für diese Hypothese einerseits das Red Book selber an, in welchem die Uranressourcen zu höheren Preisen (welche einen niedrigeren Erzgehalt widerspiegeln) bei weitem nicht mit diesem Faktor steigen, eher sogar sinken – und gibt den erhöhten Energieaufwand bei niedrigen Erzgehalten als zusätzlichen wichtigen Faktor an.

Der Erzgehalt spielt eine wesentliche Rolle dabei, ob Uran wirtschaftlich abgebaut werden kann. Der **Energiebedarf** für den Abbau steigt zusammen mit dem Wasserverbrauch und den Kohlendioxidemissionen mit zunehmender Abbautiefe kontinuierlich an, da für den gleichen Uranoutput mehr Erz aus dem Boden gehoben werden muss.

Es ist wahrscheinlich, dass in Zukunft der Erzgehalt der Uranminen sinken und die nötige Abbautiefe steigen werden. Der langjährige Trend der letzten 50 Jahre zeigt ein kontinuierliches Sinken des Erzgehaltes. Der Erzgehalt hat starke Auswirkungen auf Energie- und Wasserbedarf sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dies zeigt sich bereits heute in einem graduell steigenden Energie- und Wasserbedarf in den Uranminen (Mudd/Diesendorf 2007a). Außerdem werden neu entdeckte Uranvorkommen höchstwahrscheinlich tiefer liegen als aktuelle Vorkommen und ebenfalls einen niedrigeren Erzgehalt aufweisen (Mudd/Diesendorf 2007b).

EWG (2006) bezieht sich auf die Studie von Storm/Smith (2005) und gibt an, dass unter einem Erzgehalt von 0,01–0,02 % die nötige Energie so hoch wird, dass die über den gesamten Lebenszyklus der nuklearen Kette benötigte Energie dem Energieoutput des Reaktors nahe kommt (Grenzerzgehalt). Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen: Um 1 kg Uran mit einem Erzgehalt von 1 % extrahieren zu können, muss man 100 kg Erz verarbeiten. 0,01 % Erz bedürfen den Abbau von 10.000 kg Erz.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die meisten „**Undiscovered Resources**“ (prognosticated and speculative) einen Erzgehalt von unter 0,02 % haben (WNA 2006, S. 31). Laut Storm/Smith kämen sie als Energiequelle wegen des negativen Energieüberschusses nicht in Frage.

### 2.5.3 Ergebnisse des EBN-Modells

Ab einem Erzgehalt von ca. 0,02 % steigt laut EBN-Modell der nötige Energieaufwand im Verhältnis zum Output stark an, bis er ihn schließlich bei 0,008 % - 0,012 % übertrifft – ab diesem Erzgehalt wird die Energiebilanz negativ (**Grenzerzgehalt**).

Bezüglich der **Reichweite der Uranressourcen** kommt die vorliegende Studie unter Annahme zu Uranressourcen verschiedener Erzgehalte der IAEA und von vier Verbrauchsszenarien zu folgenden Ergebnissen:

Tabelle 4: Zeitliche Reichweite der Uranressourcen nach Kategorien, Szenario „Best Case“

Ressourcen	Year of Exploitation			
	WNA-low	WNA-high	Constant capacity	1%-growth
Operationable	2043-2052	2030-2035	2066-2087	2052-2065
+ Exploration & Development	2057-2071	2038-2045	>2100	2073-2094
+ Unknown	2058-2072	2039-2046	>2100	2075-2097

Tabelle 5: Zeitliche Reichweite der Uranressourcen nach Kategorien, Szenario „Future“

Ressourcen	Year of Exploitation			
	WNA-low	WNA-high	Constant capacity	1%-growth
Operationable	2046-2055	2032-2037	2072-2095	2056-2069
+ Exploration & Development	2061-2075	2040-2047	>2100	2078- >2100
+ Unknown	2061-2076	2040-2048	>2100	2080- >2100

Beim WNA-high Szenario würden die Uranvorräte bereits 2030–2037 zur Neige gehen. Unter Berücksichtigung der Minen in der Explorationsphase und unbekannter Uranressourcen könnten die Vorräte bis maximal 2048 anhalten. Die Wahrscheinlichkeit, unbekannte Ressourcen zu entdecken, ist wesentlich niedriger, als sie nicht zu entdecken. Das WNA-low Szenario ergibt Reichweiten von 2043–2055 bzw. bis 2076 unter Miteinbeziehung unbekannter Ressourcen. Bei konstant bleibender Reaktorkapazität würden

die Uranreserven zwischen 2066 und 2095 erschöpft sein. Unter Annahme eines 1%igen Wachstums würde dies 2052–2069 der Fall sein, unter Miteinbeziehung von Vorkommen unter Exploration und unbekanntem Ressourcen nach dem Jahr 2100.

Diesen Reichweiten liegt folgende äußerst konservative Annahme zu Grunde: Uranressourcen unter 0,03 % (d.h. ca. ein Drittel der gesamten Ressourcen) sind zur Gänze in den angenommenen Uranressourcen enthalten. Uranressourcen unter dem Grenzerzgehalt sind also in der Berechnung der Reichweite der Uranressourcen ebenfalls inkludiert. Die tatsächliche Reichweite der Uranressourcen dürfte also kürzer sein.

Im Vergleich: Storm/Smith (2007) gehen davon aus, dass der von den Autoren errechnete Grenzerzgehalt 2058 bei gleich bleibender Kapazität bzw. 2078 bei einem jährlichen Kapazitätsanstieg von 2 % erreicht sein wird.

### **Fazit**

Neu gebaute Kernkraftwerke haben für gewöhnlich eine Nutzungsdauer von 60 Jahren und eine Vorlaufzeit für Planung und Bau von 10 bis 19 Jahren. Kernkraftwerke, deren Planung jetzt begonnen wird, würden 2070–2080 ans Ende ihrer Lebenszeit kommen, jene die jetzt in Betrieb gehen, im Jahr 2070. Wenn vom niedrigen Wachstumsszenario der WNA ausgegangen wird, würden die Uranressourcen 2043–2055 erschöpft sein. Der Grenzerzgehalt könnte jedoch früher erreicht sein und eine Nutzung mit positiver Energiebilanz unmöglich machen. Jedes Kraftwerk, das jetzt in Bau geht, könnte nicht bis zum Ende seiner Nutzungsdauer mit positivem Energieüberschuss betrieben werden. Alle Kraftwerke, die sich jetzt in Planung befinden, könnten nur einen Bruchteil ihrer Nutzungsdauer mit Energiegewinn betrieben werden. Auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen mit sinkendem Erzgehalt an.

Werte aus der Literatur bestätigen die geringe Reichweite der Uranressourcen: Dittmar (2009c) geht von einer Reichweite bis 2060 bzw. 2071 aus, Diehl (2005) geht davon aus, dass die Uranvorräte ab 2042 den Bedarf nicht mehr decken können.

## 2.6 Uranbereitstellung versus Uranbedarf

Der jährliche Bedarf an Uran von zur Zeit ca. **59.065 tU** für 3.733 GW<sub>el</sub> pro Jahr (Stand 2010) wird aus mehreren Quellen gedeckt, die man unter zwei Kategorien zusammenfasst:

- Primäre Uranquellen
- Sekundäre Uranquellen

Stehen diese Quellen nicht ausreichend zur Verfügung, kommt es sogar bei ausreichenden Uranressourcen zu Engpässen in der Versorgung, und zwar wesentlich früher, als die Erschöpfung der Uranressourcen.

### 2.6.1 Primäre Uranbereitstellung: Uranabbau

Die Primäre Uranbereitstellung erfolgt durch den Uranabbau. Er ist die größte Quelle der Uranbereitstellung und deckte über die letzten Jahre 50–75 % des weltweiten Uranbedarfs (OECD/NEA 2010, 84). 2008 betrug die weltweite Uranproduktion 43.880 tU und deckte 74 % des weltweiten Uranreaktorbedarfs von 59.065 tU (OECD/NEA 2010).

Dabei zeigt sich eine starke Diskrepanz zwischen Ländern, die Uranerz fördern und jenen, die Uran als Kernbrennstoff anwenden (zur Zeit 30 Länder). Es wird angenommen, dass in den nächsten zehn Jahre sechs Länder 83 % der Welturanproduktion stellen werden (Kasachstan, Kanada, Australien, Namibia, Russland, Niger, vgl. NE 2010). Lediglich Kanada und Russland betreiben auch KKW, diese Verteilung führt zwangsläufig zu nötigen Transporten von Uran.

### 2.6.2 Sekundäre Uranbereitstellung

Sekundäre Uranbereitstellungsmöglichkeiten sind alle Uranquellen, abgesehen vom direkten Abbau. Das umfangreiche Thema „sekundäre Uranressourcen“ soll in dieser Studie nur im Ansatz behandelt werden, um das Problem möglicher Versorgungsengpässe aufzuzeigen.

Sekundäre Uranressourcen sind:

1. Zivile und militärische Lagerbestände von natürlichem und angereichertem Uran: Das Red Book (OECD/NEA 2010) schätzt restliche Uranlager auf ca. 575.000 tU als obere Grenze, was kommerziell verfügbar gemacht werden kann (OECD/NEA 2010). Die wirkliche Höhe der Lagerbestände ist allerdings äußerst unsicher (EWG 2006, 12).
2. Kernbrennstoff aus Wiederaufbereitung von abgebranntem Kernbrennstoff aus Kernwaffen (Plutonium) kann lediglich in der kleinen Anzahl auf MOX (mixed-oxide fuel) zugelassenen Reaktoren verwendet werden (29 per 2009).
3. Uran aus Wiederanreicherung von abgereichertem Uran.

Bei der Anreicherung von Uran-235 entsteht gegenüber Natururan abgereichertes Uran, das theoretisch ebenfalls als Uranquelle verwendet werden kann. Diese Uranmengen (450.000 tU gesamt 2006) können allerdings nur von Wiederaufbereitungsanlagen mit signifikanter freier Kapazität und niedrigen Betriebskosten ökonomisch genutzt werden, welche derzeit nicht bereitsteht (OECD/NEA 2010).

Es ist nicht absehbar, dass die nötigen freien Anreicherungskapazitäten für diese Nutzung in Zukunft zur Verfügung stehen werden, wahrscheinlicher sind sogar für die normalen Anreicherungsprozesse Kapazitätsengpässe zu erwarten. Außerdem ist die Anreicherung einer der energieintensivsten Schritte der nuklearen Prozesskette. Wiedergereichertes Uran aus Russland stellt 2–7 % des Natururans dar, das nach Europa geliefert wird (OECD/NEA 2010, 95).

### 2.6.3 Versorgungsempässe

2008 betrug die weltweite Uranproduktion 43.880 tU und deckte 74 % des weltweiten Uranbedarfs für Kernkraftwerke von 59.065 tU. 15.185 t mussten also aus sekundären Quellen gedeckt werden. Seit 1990 viel die Uranproduktion unter den Uranbedarf, da sekundäre Bestände am Markt zur Verfügung standen. Für 2013 wird erwartet, dass der jährliche Uranbedarf auf 70.000 tU steigen wird (OECD/NEA 2010).

Durch eine Steigerung der Uranpreise hat die Uranminenexploration in den letzten Jahren zugenommen. Das Red Book geht davon aus, dass existierende, geplante und solche, die voraussichtlich geplant werden, den Uranbedarf des High Case Szenarios (782 GW<sub>el</sub>) bis 2028 und des Low Case Szenarios (511 GW<sub>el</sub>) bis 2035 abdecken können. Es ist also die Erschließung neuer Minen nötig, unter Voraussetzung einer Erhöhung des Uranpreises als Anreiz (OECD/NEA 2010, 12). Es ist allerdings sehr wahrscheinlich, dass neue Minenprojekte Kostenüberschreitungen und **Zeitverzögerungen** mit sich bringen – weshalb am zeitgerechten Aufbau der Produktionskapazität gezweifelt werden kann (EWG 2006, 14).

Verzögerungen können insbesondere dadurch auftreten, dass neue Produktionsanlagen in Entwicklungsländern geplant sind. Für neue Produktionsstätten muss unter Berücksichtigung von Genehmigungs- und Errichtungszeiten mit 5–15 Jahren Vorlaufzeit gerechnet werden. Bei drohenden Versorgungsempässen müssten daher schon frühzeitig neue Minen geplant werden.

In Australien wurden trotz breit angelegter Explorations-Versuche seit den 1970ern lediglich zwei neue wirtschaftliche Vorkommen gefunden. Die Anstiege der Uranressourcen gehen auf verstärkte Exploration in bekannten Uranlagerstätten zurück. Dieses Muster zeigte sich auch in anderen Ländern (Mudd/Diesendorf 2007a).

Neben dem durch manche Entwicklungsszenarien erwarteten Ansteigen des Uranbedarfs verschärft ein zusätzliches Problem die Versorgungslage. Zur Abdeckung des Bedarfs werden **sekundäre Ressourcen** weiterhin benötigt werden. Obwohl die Daten über Sekundäre Uranreserven unvollständig sind, muss von einem Rückgang in ihrer Verfügbarkeit ausgegangen werden. Ab diesem Zeitpunkt muss der Uranbedarf zu einem immer höheren Prozentsatz aus Uranabbau gedeckt werden (OECD/NEA 2010, 12).

Auch andere Quellen bezweifeln, dass der Uranabbau das teilweise Wegfallen von sekundären Quellen ausgleichen kann, sogar bei gleich bleibendem Uranbedarf wäre dies schwer möglich: daher können Engpässe bereits ab 2013 auftreten (Fleming 2007).

## 2.7 Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

Annahmen und Angaben der *Literatur* bezüglich der zeitlichen **Reichweite der Uranressourcen** schwanken, zeigen aber generell eine stark begrenzte Reichweite, insbesondere wenn von einem Wachstum der installierten nuklearen Kapazität ausgegangen wird.

- Die Angaben des Red Book 2009 (OECD/NEA 2010) gehen von der Reichweite der Reasonably Assured Ressourcen kleiner \$ 80/kgU von 43 Jahren aus, inkl. Inferred Resources würden die Uranvorräte ca. 106 Jahre halten (Annahme: kein Wachstum der nuklearen Kapazität).
- Dittmar (2009c) errechnet auf Basis der gesamten konventionellen Uranreserven des Red Book 2007 folgende Reichweiten: Minimalwachstumsszenario Reichweite bis 2071 - Maximalwachstumsszenario: Reichweite bis 2060.
- Laut Generation IV International Forum werden bereits 2030 die bekannten Ressourcen erschöpft sein.
- Laut Diehl (2005, 2006) werden die bekannten Uranreserven ca. im Jahr 2042 den Bedarf nicht mehr decken können. Dies wird umso relevanter, wenn der Erzgehalt der Lagerstätten berücksichtigt wird.

Der **Erzgehalt** ist ein wesentlicher **Einflussfaktor** auf die Reichweite der Uranressourcen:

- Erzgehalt und Abbautiefe von Uranminen sinken bereits jetzt im Mittel und werden weiter sinken (Mudd/Diesendorf 2007b).
- Mit sinkendem Erzgehalt steigen Energie- und Wasserbedarf sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen des Uranabbaus stark an – ebenso die Kosten des Abbaus.
- Lagerstätten mit einem hohem Erzgehalt machen nur einen geringen Teil der globalen Ressourcen aus, ca. 2/3 der Uranressourcen haben einen Erzgehalt von unter 0,2 %. Im Kontinent mit den höchsten Uranressourcen – Australien – weisen 90 % der Uranressourcen weniger als 0,06 % Erzgehalt auf. Auch die Ressourcen des derzeit größten Uranproduzenten Kasachstan haben Erzgehalte von weit unter 0,1 %.

Ab einem bestimmten Erzgehalt (**Grenzerzgehalt**) wird soviel Energie im Uranabbau benötigt, dass über den Lebenszyklus kein Energieüberschuss mehr produziert wird. Die Modellierungen der vorliegenden Studie ergeben einen Grenzerzgehalt von ca. 0,008–0,012 %, ab einem Erzgehalt von 0,02 % sinkt der Nettoenergieoutput allerdings bereits rapide.

Die **Reichweite der Uranressourcen** unter Berücksichtigung des Grenzerzgehaltes wurde in vorliegender Studie für verschiedene Szenarien berechnet. Neu gebaute Kernkraftwerke haben für gewöhnlich eine Nutzungsdauer von 60 Jahren und eine Vorlaufzeit für Planung und Bau von 10 bis 19 Jahren. Kernkraftwerke, deren Planung jetzt begonnen wird, würden 2070–2080 ans Ende ihrer Lebenszeit kommen, jene die jetzt in Betrieb gehen, im Jahr 2070. Wenn vom niedrigen Wachstumsszenario der WNA ausgegangen wird, würden die Uranressourcen 2043–2055 erschöpft sein. Der Grenzerzgehalt könnte jedoch früher erreicht sein und eine Nutzung mit positiver Energiebilanz unmöglich machen. Jedes

Kraftwerk, das jetzt in Bau geht, könnte nicht bis zum Ende seiner Nutzungsdauer mit positivem Energieüberschuss betrieben werden.

Zur Abdeckung des jährlichen Uranbedarfs werden **sekundäre Ressourcen** weiterhin benötigt. Obwohl die Daten über sekundäre Uranreserven unvollständig sind, wird von einem Rückgang in ihrer Verfügbarkeit ausgegangen, besonders nach 2013. Ab diesem Zeitpunkt muss der Uranbedarf zu einem immer höheren Prozentsatz aus Uranabbau gedeckt werden (OECD/NEA 2010, 12). Auch andere Quellen bezweifeln, dass die Uranproduktion das teilweise Wegfallen von sekundären Quellen ausgleichen kann, sogar bei gleich bleibendem Uranbedarf wäre dies schwer möglich: Engpässe können bereits 2013 auftreten (Fleming 2007).

Um auf drohende Versorgungsengpässen zu reagieren, werden **Generation-IV-Reaktoren** entwickelt, die ihren Brennstoff teilweise selbst erbrüten. Die Entwicklung dieser Reaktoren befindet sich allerdings noch in einem frühen Stadium, ist kostenintensiv und mit ungelösten Problemen behaftet, wie etwa Sicherheitsprobleme bei schnellen Brütern und Thoriumreaktoren sowie hohe Kosten für die Entwicklung und den Bau.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Fokus auf den Ausbau der Nuklearindustrie eine Investition in eine Wirtschaft mit schwindender Rohstoffquelle und möglichen Rohstoffengpässen bedeuten würde, deren Energieausbeute in absehbarer Zeit stark sinken wird.

### 3 Literatur

- Andseta, S., Thompson, M. J., Jarrell, J. P., Pendergast, D. R. (1998): CANDU reactors and greenhouse gas emissions. In: Proceedings of the 19th Annual Conference, Canadian Nuclear Society, Toronto, Ontario, Canada, Oktober 1998.
- Arnold, N.; Brodowski, R., Gepp, C.; Giersch, M., Gufler, K.; Lahodynky, R., Hellersschmidt-Alber, J. (2010): Uran als Kernbrennstoff: Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit. Institut für Sicherheits- und Risikowissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien. Themenreport zur Konferenz und Podiumsdiskussion am 15. Sept. 2010. Herausgegeben von der Wiener Umwelthanwaltschaft. Wien 2010.
- Barnaby, F., Kemp, J. (2007): Secure Energy? Civil Nuclear Power, Security, and Global Warming. Oxford Research Group, Oxford March 2007.
- Deffeyes, K.S, MacGregor, I.D (1980): World uranium resources. Use of log-curves in estimation. OSTI Identifier OSTI ID: 6665051, Jan 1980.
- Diehl, Peter (2005): Präsentation des Wise-Uranium Projects. Zugriff 22. Okt. 2010  
<http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stk03e>.
- Diehl, Peter (2006): Reichweite der Uran-Vorräte der Welt. Erstellt für Greenpeace Deutschland. Berlin, Januar 2006.
- Dittmar, Michael (2009c): The Future of Nuclear Energy: Facts and Fiction Chapter III: How (un)reliable are the Red Book Uranium Resource Data? ETH Zürich, Institute of Particle Physics".
- Dones, R., Heck, T., Hirschberg, S. (2003): Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems. Verfügbar unter [http://gabe.web.psi.ch/pdfs/Annex\\_IV\\_Dones\\_et\\_al\\_2003.pdf](http://gabe.web.psi.ch/pdfs/Annex_IV_Dones_et_al_2003.pdf).
- Dones, R., Zhou, X., Tian, C. (2004): Lifecycle assessment of chinese energy chains for shandong electricity scenarios. International Journal of Global Energy Issues 22 (2/3), S. 199–224.
- Dones, R., Heck, T., Emmenegger, M., Jungbluth, N. (2005): Lifecycle inventories for the nuclear and natural gas energy systems, and examples of uncertainty analysis. International Journal of Lifecycle Assessment 10 (1), S. 10–23.
- EWG (2006): Uranium Resources and Nuclear Energy. Energy Watch Group. EWG-Series No 1/2006. Ottobrunn/Aachen Dezember 2006.
- Fleming, D. (2007): The Lean Guide to Nuclear Energy. A Life-Cycle in Trouble. The Lean Economy Connection. November 2007.
- Fritsche, U. R., Lim, S. (2006). Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life- Cycle Perspective. Öko Institute, Darmstadt, Deutschland, Jänner 2006.
- Fthenakis, V., Kim, H. C. (2007): Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: a life-cycle study. Energy Policy 35, 2549–2557.
- Hondo, H. (2005): Lifecycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. Energy 30 (2005), 2042–2056.
- IAEA (2001): Analysis of uranium supply to 2050. STI/PUB/1104. Wien Mai 2001.

- IAEA (2008): International Status and Prospects of Nuclear Power  
<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/NuclearPower/np08.pdf>.
- IAEA PRIS (2010): <http://prisweb.iaea.org/Wedas/WEDAS.asp>, Zugriff 24. Sept 2010.
- International Energy Agency (2002). Environmental and Health Impacts of Electricity Generation: A Comparison of the Environmental Impacts of Hydropower with those of Other Generation Technologies. IEA Implementing Agreement for Hydropower Technologies and Programs, Ontario, Juni 2002.
- ISA (2006): Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia. ISA - The University of Sydney.
- Kaatsch, P., Spix, C., Schmiedel, S., Schulze-Rath, R., Mergenthaler, A., Blettner, M. (2007): Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie). Zusammenfassung. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Bundesamtes für Strahlenschutz. Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums (UFOPLAN) Reaktorsicherheit und Strahlenschutz.
- Mudd, Gavin, Diesendorf, Mark (2007b): Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting. Australia.
- OECD/NEA (2010): Uranium 2009: Resources, Production and Demand. The Red Book 2009. NEA No. 6891.
- Prognos (2009): Renaissance der Kernenergie? Analyse der Bedingungen für den weltweiten ausbau der Kernenergie gemäß den Plänen der Nuklearindustrie und den verschiedenen Szenarien der Nuklearenergieagentur. PROGNO AG. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz Deutschland. Berlin/Basel im September 2009.
- Rashad, S.M., Hammad, F.H. (2000): Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricitygenerating systems. Applied Energy 65, 211–229.
- Rotty, R. M., Perry, A. M., Reister, D. B. (1975): Net Energy from nuclear Power. Institute for Energy Analysis. IEA-Report IEA-75-3. November 1975.
- Storm van Leeuwen, J.W., Smith, P. (2005): Nuclear power - The energy balance. Quelle: <http://www.stormsmith.nl/> Chaam, Niederlande.
- Storm van Leeuwen, J.W., Smith, P. (2007): Nuclear power - The energy balance. Quelle: <http://www.stormsmith.nl/> Chaam, Niederlande.
- Storm van Leeuwen, J.W., Smith, P. (2008): Nuclear power - The energy balance. Quelle: <http://www.stormsmith.nl/> Chaam, Niederlande.
- US DOE/GIF (2002): A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee und dem Generation IV International Forum. Dezember 2002.
- WEG (2008): Reserven und Ressourcen. Potenziale für die zukünftige Erdgas- und Erdölversorgung. Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V.
- Weisser, D. (2007): A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. PESS/International Energy Agency. Austria.

White, S.W., Kulcinski, G.L. (2000): Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO<sub>2</sub> gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants. *Fusion Engineering and Design* 48 (248), 473–481.

WNA (2009b): Energy balances and CO<sub>2</sub>-implications. World Nuclear Association.  
<http://www.world-nuclear.org/info/inf100.html>.

WNA (2010): WNA Nuclear Century Outlook  
[http://www.world-nuclear.org/outlook/nuclear\\_century\\_outlook.html](http://www.world-nuclear.org/outlook/nuclear_century_outlook.html).





Als etablierte Forschungs- und Beratungseinrichtung ist das Österreichische Ökologie-Institut seit 1985 im Umfeld Ökologie und Nachhaltigkeit tätig. Wir arbeiten für und mit Politik und Verwaltung, Wirtschaft und Interessensvertretungen sowie den direkt Betroffenen von gesellschaftlichen Veränderungen. Unsere ExpertInnen aus unterschiedlichen Fachbereichen bieten ein breites Feld an inhaltlichen und methodischen Zugängen. Damit stellen wir uns der ambitionierten Herausforderung einer Nachhaltigen Entwicklung in seiner ökologischen, sozialen und ökonomischen Dimension. Im Kompetenzfeld Gesellschaft – Wissenschaft – Technologie beforschen und bewerten wir u.a. das nachhaltige Potenzial von Technologien zur Lösung globaler Fragen. Dafür untersuchen wir Chancen und Risiken von Technologien über ihren Lebenszyklus für Umwelt, Gesellschaft und Gesundheit. Seit 25 Jahren bearbeiten wir nukleare Fragen wie Auswirkungen der gesamten Brennstoffkette von Uranabbau bis Endlagerung auf Mensch und Umwelt, Sicherheit und Risiko von Atomanlagen, Auswirkung von schweren Unfällen und Fragen des Strahlenschutzes.



Die 1977 gegründete Österreichische Energieagentur entwickelt, fördert und implementiert Maßnahmen, die auf eine nachhaltige Energieversorgung sowie auf den effizienten Einsatz von Energie abzielen. Innovative Energietechnologien, energieeffiziente Systeme und erneuerbare Energiequellen etc. zählen zu den relevanten Themenfeldern. Die Österreichische Energieagentur trägt somit zur Formulierung und Umsetzung der Energie-, Technologie- und Forschungspolitik auf Bundes- und Landesebene bei. Darüber hinaus kooperiert sie national, international sowie auf EU-Ebene im Rahmen von Projekten mit verschiedenen Institutionen, um die nachhaltige Energieversorgung voranzutreiben. Für diese Zwecke beschäftigt die Österreichische Energieagentur ein interdisziplinär zusammengesetztes Team von etwa siebzig MitarbeiterInnen.

Diese Studie liefert Informationen über den Energieeinsatz für die Stromproduktion mittels Nuklearenergie über den Lebenszyklus. Folgende Kernfragen werden behandelt: Welche Faktoren einschließlich des Erzgehalts haben den größten Einfluss auf den Energieüberschuss? Ab welchem Erzgehalt wird kein Energieüberschuss mehr produziert? Kann eine Fokussierung auf Kernenergie zum Klimaschutz beitragen? Die einzelnen Schritte der nuklearen Brennstoffkette wurden zu einem Großteil bottom-up modelliert.