

Dieter Seeliger

Ambivalenzen in der Uranwirtschaft – Segen oder Fluch für die Menschheit?

1. Hintergrund

Bereits im Brundtland-Report wurde Nachhaltigkeit als Maßstab für vernünftiges technologisches Handeln gesetzt und wie folgt definiert: Nachhaltige Entwicklung „ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Hauff 1987, S. 46). Betrachtet man im Lichte dieser Forderung die Gewinnung von Kernenergie zur Befriedigung des wachsenden Energiebedarfs der Menschheit, so treten Ambivalenzen besonders drastisch zutage:

Einerseits werden weltweit 16% und in Europa sogar 31% der Elektroenergie auf Basis von Kernenergie erzeugt und dabei etwa 2,6 bis 3,5 Mrd. t CO₂-Emission pro Jahr vermieden. Kernkraftwerke (KKW) weisen gegenüber anderen Verfahren eine geringe Mortalität auf, gelten somit als besonders sicher. Darüber hinaus sind sie geeignet für die Sicherung der Grundlastversorgung und damit ideal für die Kombination mit der Elektroenergieerzeugung aus den regenerativen Quellen Sonne und Wind. Bedeutende Erweiterungen der Kernenergienutzung sind derzeit in Südasien und im Fernen Osten vorgesehen. Auch in benachbarten europäischen Ländern wird gegenwärtig die bereits beschlossene Ausstiegspolitik revidiert (Schweden) bzw. der Neubau von KKW geplant (Großbritannien, Italien u.a.). In den USA, wo seit 30 Jahren keine neuen KKW in Betrieb gingen, liegen derzeit 27 neue Genehmigungsanträge vor. Präsident Obama hat zu Beginn des Jahres 2010 einer „Blue Ribbon Commission on America’s Nuclear Future“ den Auftrag erteilt, eine umfassende Studie zu Fragen des Brennstoffzyklus vorzulegen.¹

1 Vgl. http://brc.gov/commissioned_papers.html.

Andererseits stellt der Einsatz der Kernenergie extreme Anforderungen an die Sicherheit der gesamten Kraftwerkstechnik, indem bereits vergleichsweise geringfügige Ausfälle von Komponenten zu extrem negativen Folgen führen können. Es bleiben unkalkulierbare Restrisiken. Die Gefährdung durch Proliferation von Kernmaterial und Terrorismus wiegt ebenfalls schwer auf der Negativseite der Bilanz. Von besonderem Gewicht ist allerdings die immer noch als ungelöst angesehene Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus Kernreaktoren der 2. Generation. So ist es nicht verwunderlich, dass weltweit über die Zukunft der Kernenergie kontrovers argumentiert wird. Die Palette diskutierter Szenarien reicht vom sofortigen Ausstieg bis zum verstärkten Ausbau und Weiterentwicklung. Inwieweit die mit der Nutzung der Kernenergie verbundenen Risiken als annehmbar angesehen werden können, ist eine Frage der Beurteilung vieler Gesichtspunkte, die auch die spezifischen Risiken alternativer Energieträger in Betracht ziehen muss (vgl. EPS 2007).

Im vorliegenden Beitrag wird ein zentraler Teil der Kernenergiegewinnung herausgegriffen – die Uranwirtschaft – und für dieses immer noch umfangreiche Gebiet anhand von Beispielen bestimmte Aspekte der Ambivalenzen herausgearbeitet. Die Beispiele entstammen insbesondere zwei Tätigkeitsbereichen der General Atomics Gruppe, San Diego, USA,² in welcher der Autor tätig war und zu der auch das sächsische Ingenieurunternehmen Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden (UIT)³ sowie das australische Bergbauunternehmen Heathgate Resources Pty., Adelaide, Australien,⁴ gehören – es handelt sich dabei um die Tätigkeitsbereiche Uranbergbau und Brennstoffwirtschaft.

2. Uranbergbau

Ausgangsstoffe für die Energiefreisetzung aus Kernspaltung sind bekanntlich die Elemente Uran und Thorium, welche in der Erdkruste mit 2,4 mg/kg bzw. 7,2 mg/kg vorhanden sind. Die weltweit bisher erkundeten Vorräte wurden 2007 auf 14,8 Mio. t geschätzt, darunter 4,7 Mio. t an gesicherten Reserven (vgl. EPS 2007). Der Uranmarkt der letzten Jahre weist einen kontinuierlichen Anstieg bei Erschließung, Abbau und Bedarf auf. Infolge der weiteren Exploration, angetrieben durch die Preisentwicklung auf dem Rohstoffsektor,

2 Vgl. www.gat.com.

3 Vgl. www.uit-gmbh.de.

4 Vgl. www.heathgateresources.com.au.

steigen diese Prognosen ständig, so dass zum Monat Januar 2009 die gesicherten Reserven bereits mit 6,3 Mio. t angegeben wurden (vgl. OECD/IAEA 2010). Bei einer erwarteten Bedarfssteigerung bis zum Jahr 2025 auf 82.000 bis 102.000 t pro Jahr reichen die bekannten Reserven selbst bei offenem Brennstoffkreislauf für mehr als 100 Jahre. Dieser Zeithorizont wächst ständig weiter, bisher ohne erkennbares Ende. Uran als Brennstoff ist also noch für längere Zeit verfügbar.

Die Entwicklung des Uranpreises in jüngster Vergangenheit widerspiegelt die Erwartungen der Industrie an die künftige Bedarfsentwicklung: Nach 1986 war, als Folge der Reaktorhavarie in Tschernobyl, der Preis für handelsübliches Yellow Cake U_3O_8 von 25 US\$/lbs unter den Wert von 10 US\$/lbs gefallen. Es dauerte Jahre, bis sich der Preis wieder erholte, um vor der Rohstoffkrise im Jahr 2007 auf über 100 US\$/lbs anzusteigen. Nach kurzzeitigem Verfall steigt der Preis und hat gegenwärtig bereits wieder 50 US\$/lbs überschritten – ein untrügliches Zeichen für Zuversicht des Marktes in die künftige Entwicklung (vgl. OECD/IAEA 2010).

Ursachen der Ambivalenz des Uranbergbaus bilden Gesundheitsgefährdungen für Personal und Anwohner sowie ökologische Folgeschäden und die damit verbundenen Folgekosten für die Rehabilitierung der Lagerstätten und Betriebsflächen. Welch gravierende Unterschiede sich infolge des technologischen Fortschritts im Zuge der Entwicklung in dieser Hinsicht ergeben haben, soll anhand folgender zwei Fälle gezeigt werden.

Fall 2.1: Sanierung des ehemaligen Laugungsbergwerks Königstein

Nach Einstellung des aktiven Uranabbaus in den Betrieben der WISMUT GmbH im Jahr 1990 sah sich das Unternehmen des Bundes mit einem enormen Sanierungsbedarf konfrontiert, worüber – ebenso wie von den erzielten Sanierungsfortschritten – wiederholt publiziert wurde (vgl. Hagen et al. 2000; WISMUT 2000/2009). Als besonderer, weil weltweit einmaliger, Problemfall erwies sich das ehemalige Laugungsbergwerk in Königstein, am Rande der Sächsischen Schweiz, über dessen Spezifik nachfolgend kurz berichtet wird.

Die besonderen Umweltrisiken in diesem Fall ergaben sich dadurch, dass – wegen geringer Ergiebigkeit der sekundären Lagerstätte – seit 1967 eine untertägige Laugung des Sandstein-Erzkörpers mit Schwefelsäure vorgenommen worden war. In dessen Folge verblieben zum Zeitpunkt der Einstellung des Abbaus im Jahr 1990 etwa 2 Mio. t verdünnter Schwefelsäure in den Porenwässern des Gesteins, mit einem pH-Wert im Bereich 0,9 bis 2,5 und einer

Mineralisation von 3 bis 25 g/l, darunter 50 bis 500 mg/l Uran. Ein sofortiger Stopp der Wasserhaltung und Flutung der Grube hätte verheerende Folgen für die Kontamination des Grundwassers in den für die Trinkwassergewinnung genutzten Horizonten im weiten Umfeld gehabt.

Um irreparable Umweltschäden auszuschließen, wählte WISMUT, in Abstimmung mit den Aufsichtsbehörden, den Weg der kontrollierten, gesteuerten Flutung der Grube. Das aus dem Flutungsraum abströmende belastete Flutungswasser wurde in einem Kontrolltunnel erfasst, der weiträumig den Grubenraum in den gefährdeten Abströmrichtungen Nord und West umschließt. Daraus ergab sich die Aufgabe, dieses Flutungsmedium zu heben und in einer Aufbereitungsanlage für Flutungswasser (AAF) über Tage zu reinigen, um die maximalen Einleitwerte in den Vorfluter Elbe mit Sicherheit zu unterschreiten (siehe Abbildung 1).

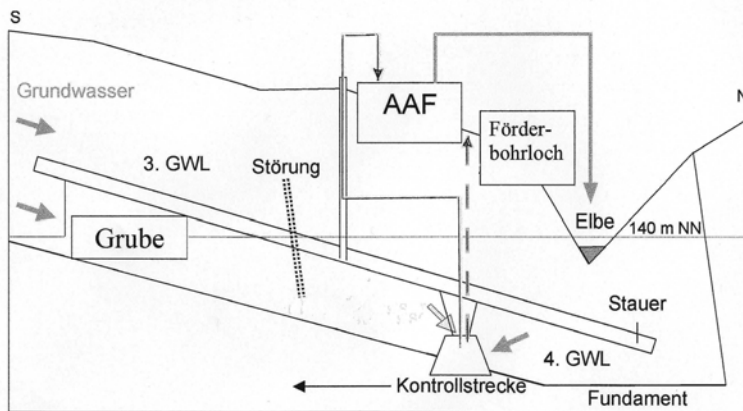


Abbildung 1: Flutungskonzept für die Grube Königstein

AAF– Aufbereitungsanlage für Flutungswasser

GWL– Grundwasserleiter

Quelle: nach Schreyer et al. 2002, p. 757

In den Jahren ab 1993 erhielt UIT den Auftrag von WISMUT GmbH, Konzeption und Technologie für die Behandlung des sauren, stark belasteten Flutungsmediums auszuarbeiten, die kritischen technologischen Verfahrensbau- steine in Pilotversuchen zu testen, daraus sukzessive alle Planungsstufen abzuleiten, inklusive erforderlicher Genehmigungen, und schließlich Bau und Inbetriebnahme auszuschreiben und zu überwachen. Die Inbetriebnahme

erfolgte Anfang 2001, dem Beginn der kontrollierten Flutung. Seitdem läuft die Anlage ohne gravierende technologische Probleme und hat bis Ende 2009 ca. 4,2 Mio. m³ Flutungsmedium gereinigt (vgl. WISMUT 2000/2009).

Um auszuschließen, dass die erwarteten großen Mengen an Uran im Flutungsmedium über Fällschlämme der Wasserreinigung auf die Betriebshalde gelangen, musste ein neues Verfahren gefunden und erprobt werden, mit welchem Uran aus dem stark Sulfat- und Eisen-haltigen Medium abgetrennt, als reines Uranoxid $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, einer Vorstufe des Handelsproduktes Yellow Cake U_3O_8 , ausgefällt und nachfolgend einer Verwertung zugeführt werden kann. Zu diesem Zweck wurde eine Kombination von zeitlich fraktionierter Elution des Ionenaustauscher-Harzes mit einer fraktionierten Fällung mittels Wasserstoffperoxyd und Natronlauge entwickelt und nach erfolgreichem Einsatz patentiert (vgl. Märten et al. 1999, 2002). Auf diese Weise gelingt es, ein hochreines Uranprodukt zu erzeugen, welches für seine nachfolgende Verwertung keiner weiteren chemischen Umfällung mehr bedarf, sondern nur noch zu U_3O_8 getrocknet zu werden braucht.

Auch die technologisch nachgeschaltete Wasserreinigung erforderte – einerseits wegen der erwarteten großen Mengen (bis über 500 m³/h) an Flutungsmedium mit hoher Salz- und Schwermetallbelastung und andererseits der Forderung nach hohem Feststoffgehalt des Fällschlammes – die Entwicklung eines neuen Verfahrens. Als geeignet erwies sich die Modifizierung des HDS-Verfahrens (High Density Sludge), das vielfache Schlamm-rezyklierung im Prozess und stufenweise Neutralisation des Mediums vorsieht und ebenfalls patentiert werden konnte (vgl. Heinze et al. 2002). Der in diesem Verfahren anfallende, schadstoffbelastete Fällschlamm kann aus der Wasserbehandlungsanlage kontinuierlich abgezogen, dekantiert und auf der nahegelegenen Bergehalde sicher eingelagert werden.

Zur Überwachung des Flutungsverlaufs erhielt UIT GmbH parallel den Auftrag, das untertägige Monitoring aufzubauen, mit insgesamt 243 Sensoren zur Kontrolle von Parametern der Grubenluft und -wässer sowie der Geomechanik. Schließlich war ein geo-chemisches und geo-hydrologisches Modell über die zeitliche Entwicklung des Flutungsmediums auszuarbeiten (vgl. Kalka et al. 2002). Erst nachdem alles vorlag, gab die Aufsichtsbehörde Anfang 2001 die Flutung der Grube selbst frei (vgl. Schreyer et al. 2002).

Die jüngsten Umweltberichte (vgl. WISMUT 2000/2009) weisen den enormen Fortschritt aus, der im Zeitraum von 2001 bis 2009 auf dem Gebiet der Wasserbehandlung erreicht wurde. So ist der Urangehalt im Flutungsmedium im Mittel unter 1 mg/l gesunken. Der Urangehalt im Abgang in die Elbe

blieb stets unter 0,1 mg/l und unterschritt damit deutlich den Überwachungswert von 0,5 mg/l. Um Übertritte von Kontaminationen in den sensiblen 3. Grundwasserleiter (GWL) zu vermeiden, wurde der Flutungspegel in der Grube zunächst bei 105 m NN konstant gehalten und die Behandlung bei konstantem Pegel fortgesetzt.

Ab dem Jahr 2010 wurde mit der Flutung des bisher offen gehaltenen Kontrolltunnels begonnen, nachdem zuvor zwei Förderbohrlöcher von der Oberfläche direkt in den Tunnel niedergebracht worden waren. Mit dieser Maßnahme entfällt die gesonderte Wasserhaltung zur Trockenlegung bestimmter Teile der Grube, die Schächte werden abgeworfen und der ehemalige Kontrolltunnel übernimmt die Funktion eines Brunnens, aus dem das kontaminierte Wasser zur Behandlung gehoben wird. Der weitere Anstieg des Flutungspegels wird weiterhin gesteuert erfolgen, abhängig von den diversen Messergebnissen der Sonden. Neben einem begleitenden, weiträumigen Monitoring sind zusätzliche Maßnahmen zur Schadstoffimmobilisierung vorgesehen. Damit ist ein Ende der Sanierungsarbeiten terminlich noch nicht in Sicht.

Bedenkt man die einst hohen Aufwendungen für den Abbau, zuzüglich der – bisher bereits zwanzig Jahre lang aufgebracht – enormen Folgeaufwendungen zur Verhinderung von Umweltschäden und setzt sie in Bezug zu den bekannten Uranmengen, die in dieser Grube gewonnen wurden, so ergibt sich – selbst wenn der hier gewonnene Rohstoff jemals zur Energiegewinnung verwendet worden wäre – sicher kein positiver Beitrag zum ambivalenten Bild des Uranbergbaus. Im Gegenteil: Im vorliegenden Fall war die Gewinnung des Rohstoffs Uran bis 1990 weder unter Beachtung des Kriteriums der Nachhaltigkeit noch unter wirtschaftlich vertretbaren Gesichtspunkten erfolgt. Würde diese Situation generell den Verhältnissen im Uranbergbau entsprechen, so wäre dies bereits ein Sachverhalt, der die Sinnfälligkeit der künftigen Nutzung der Kernenergie in Frage stellt. Positiv zu sehen sind dagegen die Erfahrungen und technologischen Ergebnisse, die beim Sanierungsprozess bisher bereits gewonnen wurden und die auch künftig immer noch anfallen werden.

Fall 2.2: Laugungsbergwerk der Heathgate Resources Pty., Australien

Im Jahr 1998 erhielt UIT den Auftrag, für eine Lagerstätte in Südaustralien, nahe der Gegend Flynders Ranches, die sich im Besitz der Gesellschafter der General Atomic(GA)-Gruppe befindet, ein technologisches Konzept vorzulegen für die Gewinnung von handelsüblichem Yellow Cake. Als technische

Basis hierfür diente eine Feldanlage, mit deren Hilfe Pilotversuche vorgenommen werden konnten. Bei der Auswahl und Optimierung der zu realisierenden Technologie waren einerseits der hohe Urangehalt des sekundären Erzkörpers, andererseits aber auch der hohe Chloridgehalt des Grundwassers in der erzhaltigen Gesteinsschicht zu berücksichtigen. Letzterer schloss den Einsatz gängiger Verfahren, wie der Karbonatlaugung, von vornherein aus. Für das vom Bergbau tangierte ökologisch sensible Gelände mussten Umweltverträglichkeitsanalysen vorgelegt und ein geo-chemisches und geo-hydrologisches Modell erarbeitet werden, ehe die behördlichen Genehmigungen erteilt wurden.

Ein Jahr später legte UIT die Ingenieurplanung vor, nach der von der Bergbaufirma Heathgate Resources beauftragte australische Unternehmen die Detailplanung und den Bau vornahmen. So konnte bereits ab 2001 mit der Urangewinnung begonnen werden. Das Laugungsbergwerk funktioniert relativ einfach: In den Erzkörper ragen von der Oberfläche Aufgabeburgen für Laugungslösung und Förderburgen für Reichlösung. Das Laugungsfeld ist weiträumig von Monitoring-Bohrlöchern umschlossen. Tonhaltige Sperrschichten verhindern die Ausbreitung der Lösung in vertikaler Richtung, die geringe Grundwasser-Fließgeschwindigkeit – in horizontaler Richtung. So bleibt der Lösungskörper am Förderort konzentriert. Nach Abschluss der Laugung wird die Lösung im Gestein mittels Wasser ausgespült. Während die Laugung auf benachbarten Arealen fortgesetzt wird, können ausgebeutete Felder bereits wieder saniert werden. Es entstehen weder Halden, noch Schlammdeponien, lediglich Verdampfungsbecken sorgen für die notwendige Wasserbalance, die zur Fortsetzung des Prozesses erforderlich ist. Mit einem Bruchteil des in der Grube Königstein zur Hochzeit der Förderung beschäftigten Personals, wird in bedeutend kürzerer Zeit eine vergleichbar große Uranmenge in Form von verkaufsfähigem Fertigprodukt erzeugt. Die uranhaltigen Lösungen und Produkte bleiben im Routinebetrieb in Leitungen und Behältern abgeschlossen, ohne direkten Kontakt zur Bedienungsmannschaft. Spürbare Umweltgefährdungen entstehen nicht. Die Sanierungskosten werden aus dem Verkaufserlös bestritten, sind Bestandteil der Kalkulation des Verkaufspreises. Dieser Fall der Urangewinnung kann in der Tat als nachhaltig bezeichnet werden.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass der Uranabbau im Zuge der technologischen Entwicklung einen grundlegenden Wandel vollzogen hat: Das ambivalente Erscheinungsbild dieses Teils der Uranwirtschaft ist heute mit dem aus der Vergangenheit kaum noch zu vergleichen.

3. Kernbrennstoffwirtschaft

Alle europäischen Länder, die Kernenergie nutzen, sind der „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“⁵ beigetreten und haben sich damit zur Einhaltung festgelegter, hoher Sicherheitsstandards verpflichtet. Dennoch bestehen erhebliche Vorbehalte in der Öffentlichkeit gegen die Kernenergie, die sich vor allem aus der Problematik der Abfallentsorgung ergeben: Der Brennstoff besteht in der Regel aus (mit dem Isotop ^{235}U) angereichertem Uran, als chemische Verbindung UO_2 , in Form von Keramik. Die Brennstoffwirtschaft der Kernenergie mit offenem Brennstoffkreislauf besteht aus der technologischen Kette: Bergbau, Aufbereitung, Konversion, Anreicherung, Brennstoffherstellung, Energieerzeugung, (Zwischen-)Lagerung verbrauchter Brennstäbe, Endlagerung. Bei geschlossenem Kreislauf ist noch die Prozessstufe der Wiederaufbereitung eingefügt, deren Produkte wahlweise in die Konversion, die Brennstoffherstellung und die Endlagerung geleitet werden (siehe Abbildung 2).

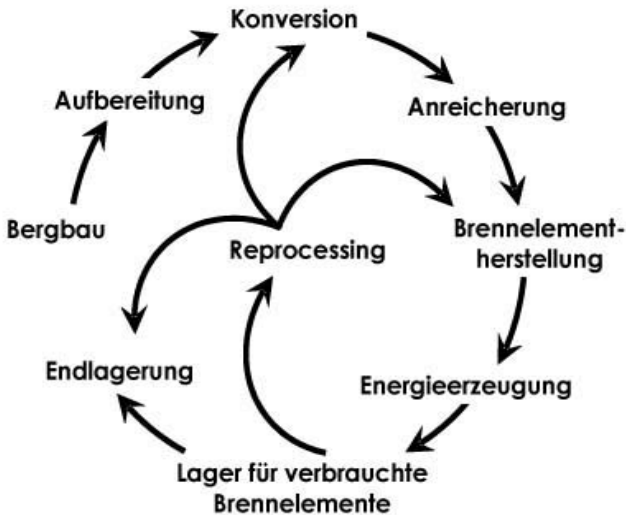


Abbildung 2: Technologische Prozesse des Brennstoffkreislaufs
eigene Darstellung

5 Vgl. <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1997/infcirc546.pdf>.

Durch Neutroneneinfang, vor allem am Hauptisotop ^{238}U , werden beim Reaktorbetrieb die Transuranelemente (TUE) Neptunium, Plutonium, Americium und Curium gebildet, wobei Plutonium den größten Teil ausmacht. Häufig werden Np, Am und Cm auch minore Aktinide genannt. Einige Isotope dieser Nuklide können nur durch schnelle Neutronen gespalten werden. In den bisher zur Elektroenergieerzeugung eingesetzten Thermischen Reaktoren kommt es daher zur ihrer Akkumulation im Brennstoff, ebenso wie von Spaltprodukten. Beide Komponenten tragen zur Radiotoxizität⁶ des verbrauchten Kernbrennstoffs (KB) bei, wobei Spaltprodukte allerdings bereits im Zeitraum bis zu einigen 10^2 Jahren abklingen, während bei TUE der Radiotoxizitätspegel von Natururan erst nach etwa 10^6 Jahren erreicht wird. In den derzeit in der EU betriebenen Reaktoren fallen jedes Jahr etwa 2500 t an abgebranntem KB an, weltweit sind das etwa 10.500 t (vgl. EPS 2007). Da der radioaktive Zerfall der Radionuklide im bestrahlten Brennstoff noch dazu mit erheblicher Wärmebildung verbunden ist, ergeben sich für unterirdische Endlager abgebrannter Kernbrennstoffe enorme Anforderungen an Langzeitstabilität der Gesteinsformation und ausreichende Kühlung.

Fall 3.1: Offener Brennstoffkreislauf

In einer Reihe von Ländern, so in den USA, wird die Nutzung der Kernenergie mit offenem Brennstoffkreislauf betrieben, dabei werden die verbrauchten Brennstoffe ohne Wiederaufbereitung einer Zwischen- und später Endlagerung – zum Beispiel in vitrifizierter Form – zugeführt. Die spezifische Energieproduktion in LWR liegt bei $5 \text{ GW}_{\text{el}} \times \text{a}$ pro t Uran. Die aus dem Rohstoff Uran durch Spaltung maximal gewinnbare Energie wird damit nur zu einem Anteil von 0,5% genutzt! Die spezifische Abfallproduktion liegt bei 250 kg TUE pro $\text{GW}_{\text{el}} \times \text{a}$. Die verbrauchten Brennelemente müssen mindestens für 170.000 Jahre eingelagert werden, bis die Radiotoxizität auf den Pegel des Uranbrennstoffs, aus dem sie hergestellt wurden, abgesunken ist. Der Bedarf an Endlagerkapazität ist daher, auch wegen der lang anhaltenden Wärmebildung, riesig. Die Uranvorräte werden auf diesem Weg schnell verbraucht, große Mengen an bereits vorhandenen Beständen an Plutonium, abgereichertem Uran u.a. nuklearen Energieträgern bleiben ungenutzt. Eine US-Studie⁷ kommt zu dem Schluss, dass unter Annahme des ausschließli-

6 Radiotoxizität stellt einen Vergleichsmaß für die gesundheitliche Gefährdung des Menschen durch unterschiedliche Radionuklide dar, der aus den Zerfallseigenschaften (Teilchenart, Energie), den radioaktiven Zerfallszeiten und der Verweilzeit im Körper abgeleitet wird.

chen Einsatzes (für die gesamte Elektroenergieerzeugung der USA) von LWR bei offenem Brennstoffkreislauf und einem jährlichen Wachstums des Elektroenergiebedarfs der USA von 2%, die für Anreicherung verfügbaren Uranvorräte der Erde nach weniger als 100 Jahren erschöpft wären und jeweils in Abständen von 10 Jahren neue Endlager mit der Kapazität des derzeit im Bau befindlichen Endlagers Yucca Mountain errichtet werden müssten. Es ist offensichtlich, dass ein solcher Weg der zukünftigen Energiegewinnung weder nachhaltig noch gegen den wachsenden Widerstand der eigenen Bevölkerung oder gegen die Rohstoffkonkurrenz seitens anderer Länder (insbesondere China, Japan, Indien) auf Dauer durchsetzbar wäre!

Werden dagegen 99,9% des Urans und Plutoniums durch Wiederaufbereitung der Brennstäbe entfernt, so verkürzt sich die erforderliche Lagerzeit auf 16.000 Jahre. Eine Entschärfung des Problems also kann durch Wiederaufbereitung verbrauchter Kernbrennstoffe mit Abtrennung von Plutonium und seiner energetischen Verwertung als neuer Mischoxid-Brennstoff UO_2/PuO_2 erreicht werden, wie sie u.a. in Frankreich vorgesehen ist. Gelingt es, auch minore Aktinide zu extrahieren, so verkürzt sich die erforderliche Lagerzeit auf 300 Jahre. Eine drastische Reduzierung der Anforderungen an die Langzeitlagerung lässt sich daher nur dann erreichen, wenn sämtliche TUE aus dem einzulagernden Material zu über 99% entfernt werden. Eine nachhaltige Gestaltung der Nutzung von Kernenergie auf lange Sicht kann somit nur gelingen, wenn es gelingt, sämtliche TUE weitgehend nuklear zu verbrennen und darüber hinaus auch abgereichertes Uran energetisch zu nutzen.

Fall 3.2: Geschlossener Brennstoffkreislauf, 4. Reaktorgeneration

Derzeit befinden sich eine Reihe von Reaktorkonzepten der 4. Generation in der Entwicklung mit dem Ziel, die nukleare Sicherheit gegenüber der 2. und 3. Generation weiter zu erhöhen, die Effektivität der Brennstoffnutzung zu verbessern und durch die Verbrennung von TUE das Abfallproblem zu entschärfen. Für das letztgenannte Ziel sind Reaktoren mit schnellem Neutronspektrum aus genanntem Grund besonders geeignet. Typische Vertreter der 4. Reaktorgeneration sind Tabelle 1 zu entnehmen (vgl. IAEA 2010; OECD NEA 2009; SNEPT 2009).

In der technologischen Entwicklung am weitesten fortgeschritten sind natrim-gekühlte schnelle Reaktoren, für welche die technologische Machbarkeit mittels großer Versuchsreaktoren in einigen Ländern bereits umfassend

7 Vgl. Gas Turbine-Modular Helium Reactor GT-MHR. – www.ga.com/energy/GT-MHR.

Typ	Neutronen- spektrum	Kühlmittel	T /°C/	Druck	Brennstoff
GFR	schnell	He	850	hoch	U-238 +
LFR	schnell	Pb-Bi	550-800	niedrig	U-238 +
MSR	epither- misch	Fluoridsalze	700-800	niedrig	UF im Salz
SFR	schnell	Na	550	niedrig	U-238 / MOX
SCWR	thermisch/ schnell	H ₂ O	510-550	sehr hoch	UO ₂
VHTR	thermisch	He	1000	hoch	UO ₂

Tabelle 1: Typische Kernreaktoren der 4. Generation GFR (Gas Cooled Fast Reactor): Gas-gekühlter, schneller Reaktor; liefert Elektrizität, Wasserstoff oder Wärme, geschlossener Brennkreislauf, effizienter Umgang mit Aktiniden

LFR (Lead Cooled Fast Reactor): Blei-gekühlter, schneller Reaktor; kleines, fabrikfertiges Kraftwerk; geschlossener Kreislauf mit sehr langen Wiederbeschickungsintervallen (15-20 Jahre), transportierbar zum gewünschten Ort zur Produktion von Energie, Trinkwasser, Wasserstoff; auch größere LFR werden in Erwägung gezogen

MSR (Molten Salt Reactor): Flüssigsalzreaktor; auf effiziente Verbrennung von Plutonium und minorer Aktiniden zugeschnitten; durch Flüssigbrennstoff entfällt die Brennstoffherstellung; inhärent sicher; als nachhaltigster Reaktor eingestuft; am besten für den Thorium-Brennkreislauf geeignet

SFR (Sodium Cooled Fast Reactor): Natrium-gekühlter, schneller Reaktor; effizienter Umgang mit Aktiniden; Umwandlung von fertilem Uran; geschlossener Brennkreislauf

SCWR (Super Critical Water-Cooled Reactor): Superkritischer wassergekühlter Reaktor; effiziente Elektrizitätserzeugung; offener Uran-Brennkreislauf der einfachsten Form; auch geschlossener Kreislauf möglich; Möglichkeit der Handhabung von Aktiniden

VHTR (Very-High Temperature Reactor): Reaktor sehr hoher Temperatur; offener Uran-Brennkreislauf; Elektrizitätserzeugung sowie Wärme für petrochemische Industrie, thermochemische Erzeugung von Wasserstoff

Quelle: nach Angaben aus EPS 2007 und SNEPT 2009

getestet werden konnte. So liegen langjährige Betriebserfahrungen mit diesem Reaktortyp u.a. in Frankreich, Japan und Russland vor. Die verbrauchten Brennelemente werden chemisch aufbereitet (Plutonium-Uran-Rückgewinnung durch Extraktion, PUREX) und das Plutonium und Uran für die weitere Nutzung als Mischoxid (MOX) verwendet.⁸ Die Extraktion von Plutonium und Uran aus verbrauchten Brennelementen wird außer Frankreich (La Hague), auch in Großbritannien (Sellafield), Russland (Mayak) und Japan (Rokkasho) durchgeführt. Der geschlossene Brennstoffkreislauf unter Ein-

⁸ Vgl. www.avevaresources.com/nuclear_energy/datagb/cycle/index.REP.htm.

satz von MOX in Schnellen Brütern bietet, neben der bereits diskutierten Verkürzung der Endlagerzeit, einen weiteren Vorteil: Die bisher bekannten Uranvorräte der Erde würden für 5.000 Jahre reichen.

Mit der Entwicklung der oben genannten zukünftigen Reaktoren der 4. Generation wird – neben der Forderung nach inhärenter Sicherheit⁹ – teilweise auch die Aufgabenstellung verbunden, minore Aktinide nuklear zu verbrennen und damit energetisch zu nutzen.

Zu dieser Gruppe zählt auch der Helium-gekühlte modular aufgebaute Hochtemperaturreaktor mit direkt angekoppelter Gasturbine (GT-MHR) von General Atomics (vgl. WNA 2010).¹⁰ Die hohe Betriebstemperatur und direkte Ankopplung der Gasturbine ohne Wärmetauscher ermöglichen eine thermische Effektivität von 50%. Die Menge an hochradioaktiven Abfällen pro Elektroenergiemenge ist bereits aus diesem Grund deutlich geringer als in herkömmlichen LWR. Die Brennstoffe sind in mehrfach keramisch beschichteten Brennstoffkügelchen (TRISO) eingeschlossen, welche ein Entweichen von Spaltprodukten sicher verhindern. Ein poröser Kohlenstoffpuffer um den Brennstoffkern vermeidet mechanische Spannungen infolge der Gasbildungsprozesse im Brennstoff. Die TRISO Brennstoffkügelchen sind in Grafitmoderatorelemente eingebettet, die vom Kühlmittel Helium umströmt werden. Diese Reaktoren sind inhärent sicher und lassen darüber hinaus eine höhere Abbrandrate des KB zu. Der GT-MHR gilt als ein bevorzugter Kandidat für US-Reaktoren der nächsten Generation.

Als Brennstoff können – neben angereichertem Uran – wahlweise auch TRISO Partikel aus Plutonium, abgereichertem Uran, Thorium und minore Aktinide zum Einsatz kommen. Auf Grundlage des GT-MHR lässt sich ein geschlossener Brennstoffkreislauf – genannt Deep Burn Prozess – aufbauen, bei dem auch Brennstoff aus abgebrannten Brennelementen von LWR zum Einsatz kommen soll.¹¹ Die verbrauchten Brennelemente des MHR werden der Wiederaufbereitung (UREX) zugeführt und dort entweder wieder in frische Uranteilchen verarbeitet, oder in Brennstoffteilchen, die Plutonium und minore Aktinide enthalten. Dem UREX Prozess können auch Abfälle aus LWR zugeführt und anschließend verbrannt werden. Damit könnte dieser Reaktortyp langfristig zum Abbau der bereits zwischengelagerten Bestände von

9 Inhärente Sicherheit bedeutet, dass die zugrunde liegenden physikalischen Wirkprinzipien des Reaktors eine Kernschmelze als GAU ausschließen.

10 Vgl. auch Gas Turbine-Modular Helium Reactor GT-MHR. – www.ga.com/energy/GT-MHR.

11 Vgl. Energy Multiplier Module (EM2). – www.ga.com/energy/EM2.

Brennstoffen aus LWR beitragen und das Endlagerproblem entschärfen (siehe Abbildung 3).

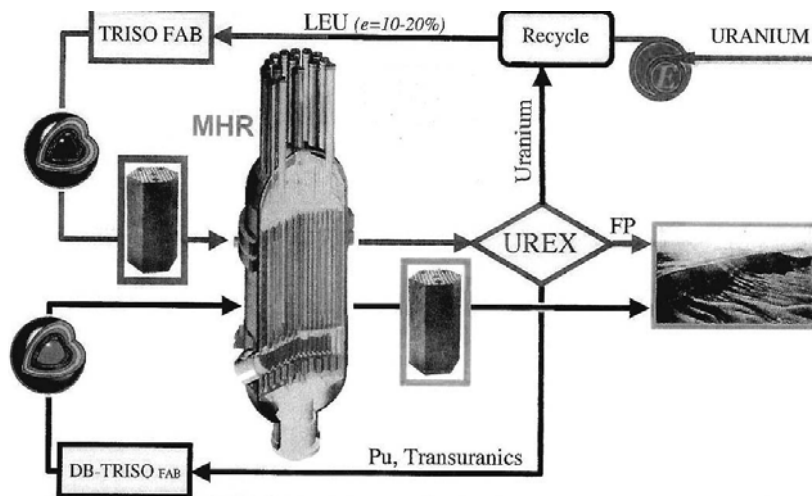


Abbildung 3: Konzept von General Atomics zum Abbau von TUE in einem MHR-Reaktor mittels Deep Burn Prozess

TRISO – beschichtete Brennstoffkugeln

UREX – Prozess der Extraktion von Uran und TUE aus abgebrannten Brennstoffen

Quelle: www.ga.com/energy/GT-MHR

Eine neuere Konzeption von GA – Energy Multiplier Module (EM²) genannt – sieht eine mehrfache Wiederaufbereitung und Rezyklierung der Brennstoffe in einem kompakten, gasgekühlten, schnellen Reaktor vor, wodurch ein erheblicher Teil der TUE, inklusive minore Aktinide, verbrannt und der nukleare Energiegehalt des Brennstoffs bei 12-facher Rückführung des Brennstoffs bis zu 50% genutzt werden könnte. Wegen der vielfachen Brennstoff-Rezyklierung beträgt die Abfallproduktion nur ein Bruchteil der eines LWR mit offenem Kreislauf – wie in Abbildung 4 für den Fall eines Reaktors mit 1,2 GW_{e1} schematisch dargestellt. Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass mit jeder nachfolgenden Rückführung des bestrahlten KB der Einsatz von frischem, angereichertem Uran für die nachfolgende Reaktorbeladung verringert werden kann, so würde langfristig der Bedarf an Urananreicherungs-kapazität fallen, trotz Zunahme der Elektroenergieproduktion. Durch spezielle Gestaltung einer porösen Brennstoffbeschichtung und ange-koppelte Gasreinigung soll erreicht werden, dass der Zeitraum zwischen den

Brennstoffbeladungen bis zu 30 Jahre beträgt.¹² Dieses interessante Konzept wurde kürzlich auch der Blue Ribbon Commission des DOE präsentiert (vgl. Parmentola 2010).

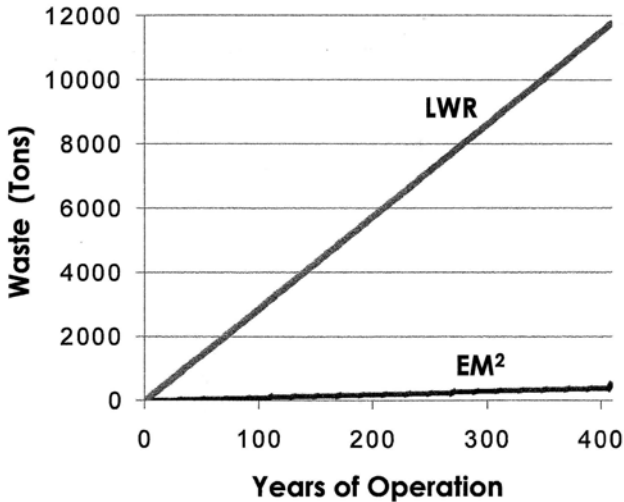


Abbildung 4: Vergleich der produzierten Abfallmengen eines LWR von 1,2 GW_{el} Leistung bei offenem Brennkreislauf mit der Abfallproduktion eines Reaktors gleicher Leistung nach dem EM²-Konzept, bei einer (hypothetischen) Laufzeit von über zehn Regenerationszyklen des Brennstoffs
Quelle: Parmentola 2010

Mit der Einführung in die praktische Nutzung von solchen Reaktorkonzepten, die sich derzeit noch in der Entwicklungsphase zwischen Studien und Pilotprojekten befinden, kann frühestens in 20 bis 30 Jahren gerechnet werden, wobei vermutlich nicht alle derzeit in Entwicklung befindliche Konzepte sich in der industriellen Praxis tatsächlich durchsetzen werden. Eine endgültige Bewertung der Perspektive einzelner Verfahren für die energetische Praxis ist daher verfrüht.

Schließlich sei noch auf die Möglichkeit hingewiesen, künftig den Thorium-Brennkreislauf aufzubauen. Neben dem Vorzug der größeren natürlichen Verfügbarkeit von Thorium gegenüber Uran besteht sein weiterer Vorteil darin, dass bei diesem Kreislauf weder Plutonium noch andere minore Aktinide

¹² Vgl. Energy Multiplier Module (EM2). – www.ga.com/energy/EM2.

entstehen, so dass die Radiotoxizität des verbrauchten Brennstoffs weit unter der beim Urankreislauf bleibt (vgl. David 2007).

Fall 3.3: Beschleunigergestützte Transmutation (Accelerator Driven Systems ADS)

Eine vollständige Verbrennung aller Isotope der TUE kann nur durch schneller Neutronen erreicht werden, da einige der gebildeten Nuklide im thermischen Neutronenspektrum nicht spaltbar sind. Mit Hilfe eines hochenergetischen Protonenstrahls können beim Beschuss metallischer Targets, beispielsweise aus flüssigem Blei, über den Spallationsprozess hohe Flüsse schneller Neutronen erzeugt werden, die für diesen Zweck geeignet und einsetzbar sind. Die in solchen Feldern bestrahlten Stoffe werden nuklear transmutiert, d.h. in andere Nuklide umgewandelt. Das kann sowohl über Spaltung, wie auch über nukleare Umwandlung unerwünschter Spaltprodukte durch Prozesse vom Typ $(n,2n)$, (n,p) , (n,pn) geschehen. Die nukleare Transmutation von verbrauchten KB könnte somit eine aussichtsreiche Methode werden, das Abfall- und Endlagerproblem auf Dauer zu lösen. Eine für die Transmutation geeignete Anlage besteht aus der Kombination eines unterkritischen Reaktors mit angekoppelter Neutronenquelle des Beschleunigers (vgl. EUROTRANS 2010; Müller/Abderrahim 2010).

Das ADS-Projekt der EU befindet sich derzeit in Belgien im Rahmen von EUROTRANS – einem Zusammenschluss von Forschungszentren, Universitäten und Unternehmen – in Arbeit. Die erste Stufe, die ADS-Demonstrationsanlage XT-ADS, soll innerhalb der nächsten Dekade realisiert werden. Ziele dieser Anlage sind: Einen supraleitenden Protonenbeschleuniger (Teilchenenergie 600 MeV, Stromstärke 2,5 mA) mit Spallationstarget (Pb-Bi-Eutektikum) mit einer subkritischen Reaktoranlage (50-100 MW_{th}) zu koppeln, die Transmutation von minoren Aktiniden zu validieren und Grundlagen für die später vorgesehene Errichtung einer European Facility for Industrial Transmutation (EFIT) zu schaffen, in der vor allem die problembehafteten minoren Aktinide transmutiert und somit energetisch genutzt werden (vgl. Müller/Abderrahim 2010).

Ist dieser Weg erfolgreich, so könnten künftig Komplexe, bestehend aus mehreren LWR und einer ADS-Anlage Zellen einer nachhaltigen, weitgehend CO₂-freien Energieerzeugung bilden und gleichzeitig das Endlagerproblem auf praktisch beherrschbare Dimensionen zurückführen, indem 99% des Abfalls vermieden werden. Für Komplexe, bestehend aus LWR, ADS und schnellen Reaktoren der 4. Generation, ergeben sich weitere Chancen,

das insgesamt auf der Erde in den natürlichen Vorkommen von U und Th verfügbare energetische Potential künftig wesentlich vollständiger und zukunfts-schonender zu nutzen und so den wachsenden Energiebedarf der Menschheit für mehr als ein Jahrtausend zu decken, ohne dabei das Problem der Abfallentsorgung ungelöst künftigen Generationen zu überlassen.

Es bestehen also berechtigte Hoffnungen, dass auch auf dem Gebiet der Abfallentsorgung für KKW in Zukunft infolge des technisch-technologischen Fortschritts neue Lösungen gefunden werden, welche die Nachhaltigkeit der Elektroenergieerzeugung auf Basis der Kernspaltung positiver bewerten lassen, als das derzeit der Fall ist. Die Umsetzung dieser Pläne in die industrielle Praxis wird allerdings noch mehrere Jahrzehnte sowie beträchtliche Forschungspotentiale und –mittel in Anspruch nehmen. Verständlich sind in diesem Lichte die Schlussfolgerungen einer vielbeachteten Studie des Massachusetts Institute of Technology,¹³ dass bei Zunahme der Kernenergienutzung kein Engpass bei der Uranversorgung zu erwarten und verbrauchter KB aus LWR für längere Zeit in zugänglichen Zwischenlagern aufzubewahren sei, bis klar ist, ob und wann die nukleare Elektroenergieversorgung auf Brütertechnologien mit Reaktoren der 4. Generation umgestellt werden kann.

4. Einige Schlussfolgerungen zum Thema Ambivalenzen

- Das zweifellos ambivalente Bild der Uranwirtschaft ist zugleich sehr dynamisch: Getrieben durch den steigenden Bedarf an Elektroenergie – derzeit vor allem in Entwicklungsländern – bewirken die Entdeckung neuer Rohstofflagerstätten weltweit einerseits und die Entwicklung neuer Technologien andererseits seine ständige Veränderung.
- Fortschritte in der Bergbautechnologie – in den vergangenen Jahren betrifft das insbesondere den in-situ Abbau von Uran mittels Laugung – führten bereits zu wesentlich verbesserter Umweltverträglichkeit und stark reduzierten Folgekosten für die Rehabilitierung der Natur. Kontinuierliche Exploration immer neuer Lagerstätten trägt dazu bei, dass bei effizientem Umgang mit dem Rohstoff Uran (und später auch Thorium) die Möglichkeiten künftiger Generationen, diese Energiequelle für die Bedarfsdeckung zu wählen, nicht durch Verknappung der Ressourcen eingeschränkt werden.
- In der Entwicklung befindliche Konzepte der vierten Reaktorgeneration

13 Vgl. <http://web.mit.edu/press/2010/nuclear-report-release.html>.

und von beschleunigergestützten Transmutationsanlagen versprechen für die Zukunft nicht nur inhärente nukleare Sicherheit und wesentlich höhere Effizienz bei der Brennstoffnutzung, sondern auch stark reduzierte Anforderungen an die Abfallentsorgung und optimalen Schutz gegen Terroranschläge.

- Wenn es gelingt, auch die genannten Entwicklungen der Kernbrennstoffwirtschaft in der industriellen Praxis der Elektroenergieerzeugung zu implementieren, würde das zugleich eine deutliche Verbesserung im Hinblick auf die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit dieser Form der Energiegewinnung bedeuten.
- Auf lange Sicht optimierte Energiestrategien sollten nicht allein auf den momentanen Ambivalenzen oder singulären Negativereignissen basieren, sondern die Entwicklungsdynamik der Uranwirtschaft berücksichtigen und ausreichend Variationsmöglichkeiten für die künftig einzuschlagenden Wege der nachhaltigen industriellen Elektroenergiegewinnung zulassen. Das bedeutet auch, unterschiedliche Optionen der Energieerzeugung parallel zu verfolgen, bis hin zur Errichtung von Demonstrationsanlagen, die Schlussfolgerungen über die Wirtschaftlichkeit und Sicherheit des Betriebs zulassen.
- Technologische Forschung und Entwicklung sowie die zugehörige Ausbildung von Fachkräften sollten stets mit ausreichender Breite erfolgen, um auch künftig rechtzeitig auf neue technologische Lösungsmöglichkeiten eingehen zu können.
- Nur aus der allseitigen Betrachtung der Ambivalenzen für die verschiedenen Wege der Energiegewinnung und ihrer vergleichenden Bewertung in ihrem dynamischen Wandel können tragfähige, nachhaltige Konzepte für die Zukunft abgeleitet werden.
- Eine bemerkenswerte Initiative startete die Europäische Kommission im Jahr 2006 indem sie die Absicht erklärte, eine gemeinsame Energiepolitik der Mitgliedsländer zu verfolgen, um zukünftigen Herausforderungen gerecht zu werden – ein Weg, gemeinsame Interessen der Mitgliedsländer auf dem Energiesektor im Kontext mit ihren nationalen Interessen nachhaltig zu lösen (vgl. EC 2006; SNEPT 2009).

Literatur

David, S.; Huffer, E.; Nifenecker, H. (2007): Revisiting the Thorium-Uranium Nuclear Fuel Cycle. In: *Europhysicsnews*, Vol. 38, No. 2, pp. 24-27. –

- URL: http://www.europhysicsnews.org/index.php?option=com_article&access=standard&Itemid=129&url=/articles/eprn/pdf/2007/02/eprn07204.pdf
- EPS – European Physical Society (2007): Energy for the Future – The Nuclear Option. A Position Paper. Mulhouse. – URL: http://www.energethique.com/fiches_pdf/EPS_PositionPaper%20The%20Nuclear%20Option.pdf
- EC – Commission of the European Communities (2006): Green Paper – A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy. Brussels, COM(2006) 105 final. –
URL: http://europa.eu/documents/comm/green_papers/pdf/com2006_105_en.pdf
- EUROTRANS (2010): EUROpean Research Programme for the TRANsmutation of High Level Nuclear Waste in Accelerator Driven Systems. Karlsruhe (FZK). –
URL: http://nuklear-server.ka.fzk.de/OFMS/Web%2FMain%2FGeneral-News%2FIPEUROTRANS_ProjectDescription_051005_final.pdf
- OECD NEA – Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency (2009): A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Paris, 21.08. –
URL: <http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm>
- Hagen, M.; Gatzweiler, R.; Jakubik, A. (2000): Status and Outlook for the Wismut Remediation Project in the States of Thuringia and Saxony, Germany. In: Proceedings of the International Conference “Radiation Legacy of the 20th Century” (RADLEG-2000). Moscow, Oct. 30 to Nov. 2, pp. 233-243
- Hauff, V. (Hg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtlandbericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven
- Heinze, G.; Märten, H.; Schreyer, J.; Seeliger, D.; Sommer, K.; Vogel, D. (2002): Flood Water Treatment by Improved HDS-Technology. In: Merkel, B.; Planer-Friedrich B.; Wolkersdorfer, Chr. (eds.): Uranium in the Aquatic Environment. Berlin a.o., pp. 785-792
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2010): Nuclear Energy Development in the 21st Century. Global Scenarios and Regional Trends. Vienna, November 17 (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.8)
- Kalka, H.; Märten, H.; Münze, R. (2002): Flooding and Post-Flooding Scenarios Dynamics and Geochemistry. In: Merkel, B.; Planer-Friedrich B.; Wolkersdorfer, Chr. (eds.): Uranium in the Aquatic Environment. Berlin a.o., pp. 1021-1028
- Märten, H.; Seeliger, D.; Sommer, K. (1999): Uranfällung mit Wasserstoffperoxyd aus sauren Bergbauwässern im Rahmen von Sanierungsarbeiten. In: Freiburger Forschungshefte, Nr. A 853 (Grundstoff-Verfahrenstechnik), S. 125-136
- Märten, H.; Schreyer, J.; Seeliger, D.; Sommer, K. (2002): Uranium Removal from Flood Water at Königstein Mine. In: Merkel, B.; Planer-Friedrich B.; Wolkersdorfer, Chr. (eds.): Uranium in the Aquatic Environment. Berlin a.o., pp. 763-768
- Müller, A.; Abderrahim, H. (2010): Transmutation von radioaktivem Abfall. In: Physik Journal, Jg. 9, November, S. 33-36

- OECD/IAEA – Organisation for Economic Co-operation and Development/International Atomic Energy Agency (2010): Uranium 2009: Resources, Production and Demand („Red Book“). Joint Report. Paris
- Parmentola, J. (2010): Energy Multiplier Module EM2. Changing the Game for Nuclear Energy. Presentation on BRC Meeting, Washington, August 30-31. – URL: http://brc.gov/Reactor_Fuel_Cycle_Technology_SC/RFCT_SC_08_30_10mtginfo.html
- Rubbia, C. (2001): The European Roadmap for Developing ADS for Nuclear Waste Incineration. Ed. by The European Technical Working Group on ADS (Accelerator Driven Systems). Roma. – URL: www.enea.it; www.enea.it/com/ingl/New-ingl/publications/ads.html
- Schreyer, J.; Zimmermann, U.; Jenk, U. (2002): Flooding of the Königstein Mine up to 80 m above Sea Level – Prediction and Reality. In: Merkel, B.; Planer-Friedrich B.; Wolkersdorfer, Chr. (eds.): Uranium in the Aquatic Environment. Berlin a.o., pp. 755-762
- SNEPT – Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (2009): Strategic Research Agenda. Report. Brussels. – URL: <http://www.snetp.eu/www/snetp/images/stories/Docs-AboutSNETP/sra2009.pdf>
- WISMUT – WISMUT GmbH Chemnitz (2000/2009): Umweltberichte. 2000 bis 2009. – URL: <http://www.wismut.de/de/umweltberichte.php>
- WNA – World Nuclear Association (2010): Small Nuclear Power Reactors. London. – URL: <http://world-nuclear.org/info/default.aspx?id=534&terms=small%20nuclear%20reactors>