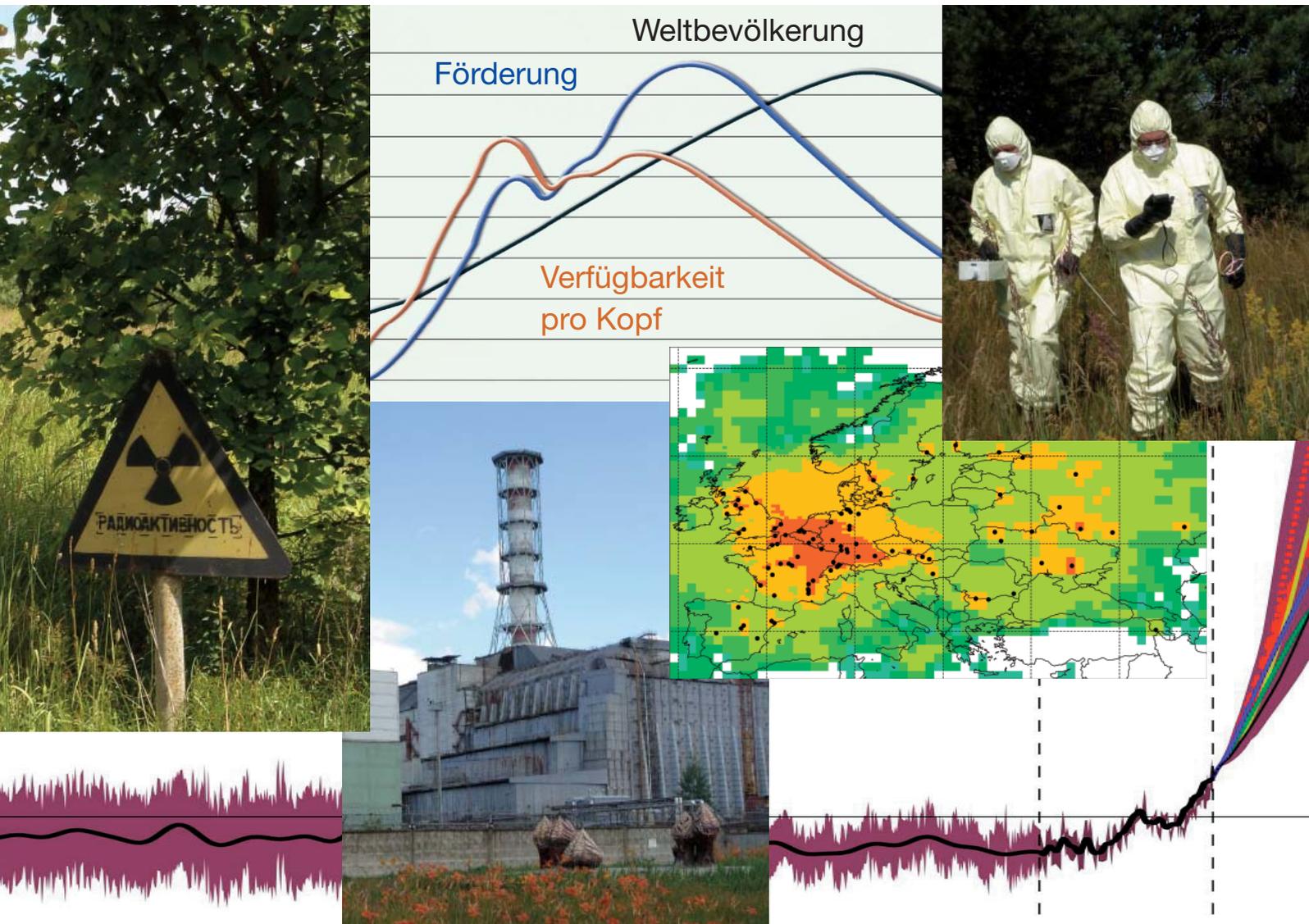




lebensministerium.at

Kernenergie, Klimaschutz und Nachhaltigkeit

Ein Argumentarium des Forum für Atomfragen





NACHHALTIG FÜR NATUR UND MENSCH SUSTAINABLE FOR NATURE AND MANKIND

Lebensqualität / *Quality of life*

Wir schaffen und sichern die Voraussetzungen für eine hohe Qualität des Lebens in Österreich.

We create and we safeguard the prerequisites for a high quality of life in Austria.

Lebensgrundlagen / *Bases of life*

Wir stehen für vorsorgende Verwaltung und verantwortungsvolle Nutzung der Lebensgrundlagen Boden, Wasser, Luft, Energie und biologische Vielfalt.

We stand for a preventive preservation and responsible use of the bases of life soil, water, air, energy, and biodiversity.

Lebensraum / *Living environment*

Wir setzen uns für eine umweltgerechte Entwicklung und den Schutz der Lebensräume in Stadt und Land ein.

We support an environmentally benign development and the protection of living environments in urban and rural areas.

Lebensmittel / *Food*

Wir sorgen für die nachhaltige Produktion insbesondere sicherer und hochwertiger Lebensmittel und nachwachsender Rohstoffe.

We provide for the sustainable production in particular of safe and high-quality foodstuffs and of renewable resources.

I M P R E S S U M

Medieninhaber und Herausgeber

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,
Stubenring 1, 1012 Wien, www.lebensministerium.at

Gesamtkoordination: Helga Kromp-Kolb (Forum für Atomfragen) und Andreas Molin (Lebensministerium)

Übersetzung: Die AutorInnen mit Unterstützung von Patricia Lorenz, Susanne Morawetz und Ilse Tweer

Layout: vorauer, friends* werbeagentur, Wels

Graphiken: Crossdesign Werbeagentur GmbH

Druck: AV + Astoria Druckzentrum GmbH

Wien 2007

Copyright: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Alle Rechte vorbehalten

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier und mit Pflanzenfarben.



GEDRUCKT MIT
PFLANZENÖLFARBEN

Zum Geleit



Österreich verfolgt seit vielen Jahren eine Politik des „Ausstiegs aus der Kernenergie“. In der Bevölkerung und quer durch alle politischen Parteien herrscht ein breiter Konsens, dass die Kernenergie eine zu riskante Form der Energiegewinnung ist und dass mit der Nutzung der Kernenergie nachfolgenden Generationen in Form des nuklearen Abfalls eine unzulässige Last aufgebürdet wird.

Inzwischen ist als Folge der Dramatik des Klimawandels die Notwendigkeit die Treibhausgasemissionen einzuschränken offenkundig geworden. Auch die absehbare Verknappung von Erdöl und in weiterer Folge von Erdgas erzwingt ein Überdenken der Energiepolitik. Infolge dessen werde ich in letzter Zeit zunehmend mit der Frage konfrontiert, ob man angesichts dieser Entwicklungen noch an der nuklearkritischen Politik festhalten dürfe. Auch die österreichischen Medien stellen hin und wieder die Frage, ob die Kernenergie nicht das geringere Übel sei.

Politik, ebenso wie Wissenschaft, muss manchmal innehalten und ihre Prämissen überprüfen. In diesem Sinne habe ich das Forum für Atomfragen, das einschlägige wissenschaftliche Beratungsgremium der Österreichischen Bundesregierung, gebeten, dieser Frage nachzugehen. Hat es Fortschritte in Wissenschaft und Technik gegeben, die eine Revision der nuklearkritischen Politik im Lichte von Klimawandel und „Peak-Oil“ nahe legen? Kann die Kernenergie mittlerweile als nachhaltige Lösung betrachtet werden?

Das Ergebnis der Analyse liegt nun vor, und die Botschaft ist keine bequeme: trotz nomineller Erhöhung der technischen Sicherheit von Kernkraftwerken belegt eine Vielzahl von „near-misses“, dass Unfälle in der Praxis keineswegs ausgeschlossen werden können; gegen Terrorangriffe können Kernkraftwerke nur in sehr beschränktem Maße geschützt werden; Weiterverbreitung ist weiterhin ein ernstes Thema und eine verantwortbare, nachhaltige Lösung für den hochradioaktiven Abfall ist nicht in Sicht. Aber selbst wenn man all diese Probleme überginge, stünde Kernenergie nicht zeitgerecht zur Verfügung, um einen signifikanten Beitrag zur Lösung der Herausforderungen des Klimawandels und der Verknappung von Öl zu liefern. Sie ist nicht einmal billig – Energieeffizienz und alternative Energien sind ökologisch und ökonomisch günstiger. Für Viele vielleicht überraschend: das spaltbare Uran würde bei einem signifikanten Ausbau der Kernenergie in wenigen Jahrzehnten verknappen – genauso, wie das Öl. Der nukleare Ausweg wäre die Plutoniumwirtschaft – in diese Richtung gehen die neuen Reaktorkonzepte – mit allen damit verbundenen Gefahren und wesentlich erhöhter Risiken der Weiterverbreitung.

Kernenergie ist also keineswegs **die** überzeugende Lösung, als die sie mancherorts angepriesen wird, sie ist offenbar gar keine Lösung. Es besteht somit kein Grund die österreichische Politik zu revidieren. Mit unseren Schwerpunkten Energieeffizienz und alternativen Energien sind wir am richtigen Weg. Wir sind überzeugt, dass wir damit auch zu jener Bewusstseinsbildung beitragen, die Voraussetzung für eine nachhaltige und verantwortungsvollere Energienutzung ist.

Josef Pröll
Umweltminister

Inhaltsverzeichnis

Zum Geleit

Inhaltsverzeichnis

Widmung

Kurzfassung: Kernenergie, Klimaschutz und Nachhaltigkeit 5

Zur Einstimmung: Energiewende – vom Öl zur Sonne 23

Peter Weish

1 Wiederbelebung der Kernenergie Diskussion: Klimawandel und „Peak Oil“ 31
Helga Kromp-Kolb und Franz Meister

2 Umweltbelastung durch den Kernenergiezyklus bei „Normalbetrieb“ 47
Helmut Hirsch und Peter Weish

3 Nukleare Sicherheit 59
Georgui Kastchiew, Roman Lahodynsky, Nikolaus Müllner, Wolfgang Kromp,
Helga Kromp-Kolb

4 Radioaktive Abfälle 103
Helmut Hirsch

5 Terror und Kriegsgefahr 119
Helmut Hirsch

6 Katastrophenschutz 139
Helmut Hirsch

**7 Möglichkeiten nuklearer Proliferation durch die Nutzung
kommerzieller Kernkraftwerke** 155
Steven C. Sholly

8 Zeitgerechtigkeit der Kernenergie Option 179
Geert Weimann und Helga Kromp-Kolb

9 Kernenergie und Kyoto-Protokoll in Perspektive 203
Anthony Froggatt

10 Nukleare Energie – Die wirtschaftliche Frage 217
Antony Froggatt

11 Nuklear erzeugter Wasserstoff – eine nachhaltige Option? 233
Steven C. Sholly

**12 Nachhaltigkeit der Gewinnung von elektrischer Energie
aus Nuklearenergie – Die rechtliche Dimension** 259
Manfred Rotter

Einfach gesagt: Häufig gestellte Fragen (FAQ) 279

Abkürzungen 289

Glossar 295

Die AutorInnen 307

Widmung



Das Forum für Atomfragen widmet das vorliegende Argumentarium seinem langjährigen Mitglied und stellvertretendem Vorsitzenden **Univ.- Prof. Dr. Manfred Heindler**, einem international anerkannten kritischen Experten in Fragen der Kernenergienutzung und Kernfusion. Er hat an der ersten Fassung des Argumentariums 2000 intensiv mitgearbeitet und war auch an der Konzeption der nun vorliegenden, wesentlich erweiterten und überarbeiteten Fassung beteiligt, bevor er krankheitsbedingt seine Mitwirkung einstellen musste. Den Abschluss der Arbeiten hat er nicht mehr erlebt; er ist am 13. Mai 2006 nach schwerer Krankheit in Graz verstorben.

Die Mitglieder des Forum für Atomfragen werden Manfred Heindler vermissen, seine Energie und seinen Optimismus, seine treffende Kritik und seine wertvollen und konstruktiven Beiträge.

Kurzfassung: Kernenergie, Klimaschutz und Nachhaltigkeit

Zusammenfassendes Diskussionspapier

Januar 2007

Kurzfassung: Kernenergie, Klimaschutz und Nachhaltigkeit

Zusammenfassendes Diskussionspapier

Januar 2007

Abstract

Zwei Herausforderungen haben die Debatte um die Kernenergie in den letzten Jahren neu belebt: die Notwendigkeit Maßnahmen zum Klimaschutz zu setzen und das absehbare Ende der Verfügbarkeit billigen Erdöls („Peak Oil“) und die hieraus erwachsenden globalen Implikationen. Aus der UN-Rahmenkonvention zur Klimaänderung (UNFCCC) und aus der EU Strategie für eine Nachhaltige Entwicklung geht hervor, dass politische und gesellschaftliche Antworten auf diese beiden gravierenden Probleme nachhaltig und umweltverträglich sein müssen.

Österreich vertritt den Standpunkt, dass Stromproduktion aus Kernenergie weder nachhaltig noch umweltverträglich ist und daher keinen geeigneten Beitrag zur Lösung dieser beiden Probleme leisten kann:

- Selbst unter Außerachtlassung der Möglichkeit von Unfällen ist die Kernenergiegewinnung mit einer Vielzahl von Umweltproblemen und Risiken behaftet, wie möglicherweise gesundheitsschädigende Radioaktivitätsfreisetzungen bei Normalbetrieb und der weltweit ungelösten Problematik der Lagerung radioaktiven Abfalls.
- Kosteneinsparungen unter dem Druck der aktuellen Marktliberalisierung haben negative Auswirkungen auf die Sicherheitskultur und die Sicherheitsmargen bei Konstruktion und Betrieb.
- Investition in Kernenergie behindert bzw. verzögert Investitionen in Effizienzmaßnahmen und behindert daher nachhaltige, ressourcenschonende Lösungen.
- Nicht zuletzt wegen der zunehmenden Weltbevölkerung, der Verknappung der Ressourcen und zunehmender Verteilungsungerechtigkeit ist davon auszugehen, dass kriegerische und terroristische Auseinandersetzungen zunehmen: dies verbietet die Förderung von Technologien und Strukturen, welche die Verwundbarkeit erhöhen und gebietet den möglichst raschen Abbau derselben und Transformation in dezentrale Technologien und Strukturen mit hoher Fehlertoleranz und geringem Gefährdungspotenzial.

Aus heutiger Sicht hat Kernenergie nicht das Potential, einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Problemlösung von „Peak Oil“ zu leisten:

- Ausbaupotential und Ausbaugeschwindigkeit, Kapitalverfügbarkeit, und Mangel an geschultem Personal begrenzen die Möglichkeiten selbst bei politischer Forcierung des Kernenergieeinsatzes. Im kommenden Jahrzehnt ist eher mit einem Rückgang als einem Anstieg des ohnehin bescheidenen Beitrages zu rechnen.

- Kernenergie hat bisher im Vergleich zu Energieeffizienz keinen wesentlichen Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen geleistet; Energieeffizienzmaßnahmen haben sich als effektiver und preisgünstiger erwiesen und bergen zudem ein erheblich größeres Potential, welches auch kurzfristig rascher erschließbar ist.
- Einen namhaften Beitrag zur Deckung des Energiebedarfes des rasch wachsenden Verkehrssektors könnte Kernenergie nur über die Erzeugung von Wasserstoff bieten. Ohne Lösung der oben angeführten Probleme der Kernenergie ist dieser Weg jedoch allein aufgrund der Zahl der Kernkraftwerke, die erforderlich wären, um eine relevante Menge an Wasserstoff erzeugen zu können, nicht gangbar.
- Die neueren, in Diskussion stehenden Kerntechnologien stellen keine Lösung dar, da deren inhärente Sicherheit weder erwiesen noch umfassend ist und die Entwicklung der 4. Generation von Reaktoren derzeit noch mehr Sicherheitsprobleme aufzuwerfen scheint, als zu lösen.
- Selbst eine Erhöhung der technologischen Sicherheit von Kernanlagen würde die Bedrohung durch kriegerische und terroristische Aktivitäten und somit die Verletzlichkeit der Regionen, in denen Kernanlagen stehen, nicht mindern.
- Die Uranvorkommen sind begrenzt. Soll die Kernenergie längerfristig einen Beitrag zur Weltenergieversorgung leisten, so führt der derzeitig einzig bekannte Weg zum Schnellen Brutreaktor und zu einer Plutoniumökonomie, die mit noch viel größeren Sicherheitsproblemen und Risiken behaftet ist.

Aus rechtlicher Sicht liegt der Kern der Anwendbarkeit des Nachhaltigkeitsprinzips in der Verteilung der Ressource Umwelt und der dabei entstehenden Lasten zwischen den gegenwärtigen und künftigen Generationen. In Analogie zum Verhältnismäßigkeitsgebot des Rechtes der Europäischen Gemeinschaft wäre der Energiebedarf der jetzigen Generation so gering wie möglich zu halten und mit möglichst geringem Aufwand an Ressourcen und Eingriffen in die Umwelt zu befriedigen. Nach den Grundsätzen der Kostenwahrheit und des Verursacherprinzips sind die Lasten der Energiegewinnung ausschließlich von jenen Generationen zu tragen, die sich ihrer bedienen. Dies schließt den Einsatz der Kernenergie in der Form der verfügbaren und heute absehbaren Konzepte aus.

Motivation und Kontext

Zwei Herausforderungen haben die Debatte um die Kernenergie in den letzten Jahren neu belebt: der notwendige Klimaschutz und das absehbare Ende der Verfügbarkeit von billigem Erdöl („Peak Oil“).

Der Wandel des globalen Klimas und der Beitrag des Menschen zu diesem Wandel durch die Emission von Treibhausgasen sind als gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse anzusehen. Die bereits zu beobachtenden und die weltweit noch zu erwartenden unerwünschten Auswirkungen dieses Wandels haben die Staatengemeinschaft veranlasst, Maßnahmen zum Schutz des Klimas zu setzen. Die UN-Rahmenkonvention zur Klimaveränderung (UNFCCC) aus dem Jahr 1992 definiert als Ziel *„...eine Stabilisierung der Treibhausgase in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, das gefährliche anthropogene Einmischung in das Klimasystem verhindert.*

Dieses Niveau soll in einem Zeitraum erreicht werden, der es den Ökosystemen erlaubt, sich auf natürliche Weise an die Klimaänderung anzupassen, der sicherstellt, dass die Nahrungsmittelproduktion nicht gefährdet wird und der ökonomische Entwicklung in einer nachhaltigen Art ermöglicht.“ Die Festlegung der notwendigen Schritte zur Erreichung dieses Zieles und der Sanktionen bei nicht erfolgter Umsetzung erfolgt schrittweise in alljährlich stattfindenden Treffen der Unterzeichnerstaaten.

Die UN-Rahmenkonvention zur Klimaveränderung (UNFCCC) verpflichtet die Vertragsstaaten überdies, nachhaltiges Wirtschaften zu fördern, die Entwicklungsländer beim Erreichen ihrer Verpflichtungen aufgrund der Konvention zu unterstützen und ihnen den Zugang zu umweltverträglichen Technologien und Know-how zu ermöglichen. Das bedeutet, dass Klimaschutz in erster Linie mittels nachhaltiger und umweltverträglicher Maßnahmen erzielt werden soll.

Erdöl ist mit einem Anteil von ca. 40 % am Weltenergieverbrauch der wichtigste Energieträger der Weltwirtschaft. Erdöl ist auch einer der wichtigsten Rohstoffe der Welt, da viele essentielle Dinge des täglichen Lebens aus der stofflichen Nutzung von Erdöl hervorgehen: Chemikalien und Lösungsmittel; Plastik, Farben und Lacke; Verpackungen, Kunstfasern (Kleidung, Teppichböden, Gardinen); Körperpflege- und Kosmetikmittel (Seifen, Parfüms, Lippenstifte und Haarsprays); Medikamente; Düngemittel und Pestizide und Baumaterialien für Infrastruktur (Straßenbau). Diese Liste illustriert, dass Erdöl, seine Verfügbarkeit und sein Preis für die Volkswirtschaften der Welt von imminently wichtiger Bedeutung sind.

Nach aktuellen Schätzungen ist etwa die Hälfte des bekannten Ölvorkommens ausgeschöpft. Der Produktionsverlauf eines Ölfeldes verläuft gemäß einer Glockenkurve, die exponentiell mit steigender Erschließung des Feldes ansteigt. Wenn der Druck im Reservoir abfällt, muss das verbleibende Öl mit zunehmend mehr Aufwand gefördert werden, tendenziell geht die Produktion Jahr für Jahr zurück. Die meisten Gebiete außerhalb des Nahen Ostens sind nahe am Produktionsmaximum oder haben dieses bereits überschritten. Die Gewinnung der verbleibenden Hälfte ist zunehmend technisch aufwendig und kostspielig und kann mit der steigenden Nachfrage voraussichtlich nicht Schritt halten. Alternativen zur eröldominierten Wirtschaft müssen daher innerhalb einer Zeitspanne von wenigen Jahrzehnten gefunden werden.

Kernenergie wird sowohl als geeignetes Mittel zur notwendigen Reduktion der Treibhausgasemissionen als auch als wesentlicher Beitrag zur Lösung der bevorstehenden Ölkrise propagiert. Als besonderes Hoffungsgebiet für die Kernenergie gilt der Verkehrssektor: Mittels Kernenergie soll Wasserstoff erzeugt werden, der das Erdöl als primärer Energieträger im Transportsektor (Ölanteil derzeit 97 %) ablösen soll.

Österreich vertritt den Standpunkt, dass Kernenergie weder nachhaltig noch umweltverträglich ist und daher nicht geeignet ist, einen Beitrag zur Lösung des Klimaproblems oder zur „Peak Oil“ Problematik zu leisten.

Das Grundproblem

So wichtig die CO₂-Reduktion und Energiesicherheit auch sind, es geht um mehr: Nachhaltigkeit ist ein Konzept, das nicht nur einen umfassenden humanökologischen Kontext betrachtet, sondern auch einen weiten Zeithorizont. Unter Nachhaltigkeit versteht man nach der Definition

der Brundtland-Kommission 1987 eine Wirtschaftsweise, welche die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt, ohne die künftigen Generationen in den Möglichkeiten zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.

Um die Forderung der Nachhaltigkeit zu erfüllen, muss Technik den folgenden Kriterien entsprechen:

- Umwelt- und Sozialverträglichkeit bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit (im volks-, nicht im betriebswirtschaftlichen Sinn)
- Überschaubarkeit (z.B. weitgehende Einschätzbarkeit in allen möglichen technischen, gesellschaftlichen und ökologischen Folgen)
- Flexibilität und
- Fehlertoleranz

Das zentrale Bewertungskriterium für jede Technologie muss lauten: Fördert oder behindert eine Technik die Entwicklung zur Nachhaltigkeit oder ist sie neutral dazu?

Im konkreten Fall ergibt diese Prüfung, dass Kernenergie

- die Umwelt belastet (z.B. Niedrigstrahlung im Normalbetrieb, hohes Katastrophenpotential)
- nicht sozialverträglich ist (z.B. Proliferationsproblematik, nicht den sozio-ökonomischen Strukturen und der Kapazitäten in Entwicklungsländern angepasst, Erhöhung der Verletzlichkeit gegenüber Terror und Krieg)
- wegen ihrer Komplexität, ihres Schadens- und Bedrohungspotentials und wegen ihrer in die ferne Zukunft reichenden Auswirkungen nicht „überschaubar“ ist (z.B. Sicherheitsverlust im liberalisierten Energiemarkt, Endlagerproblematik, Entsorgungsproblematik der Anlagen nach Nutzungsende)
- unflexibel ist (z.B. erfordert sie Folgemaßnahmen über Jahrtausende und ist an große Einheiten gebunden, hat eine schwer steuerbare Eigendynamik), und
- nicht tolerant gegenüber Fehlern ist (die neueren Konzepte möglicherweise noch weniger als die bisherigen Anlagen).

Dies wird im Folgenden an einigen Problembereichen aufgezeigt.

Probleme des Normalbetriebes

Jede Stufe des Brennstoffzyklus ist mit Belastungen der Umwelt verbunden, auch wenn alle Abläufe plangemäß erfolgen.

Der Uranabbau

Beim Uranabbau bleiben Uranreste und die gesamten abgetrennten Zerfallsprodukte zurück und werden oberirdisch in Form von Halden oder als Schlamm in einfachen Becken gelagert. Dieser Abraum enthält u. a. das Uran-Tochterprodukt Thorium-230 mit einer Halbwertszeit von 77.000 Jahren und dessen Zerfallsprodukte Radium und gasförmiges Radon. Die Isolations-Zeiträume, die bei der Endlagerung dieser Abfälle erzielt werden müssten, sind vergleichbar jenen für Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken.

Für jede Tonne Brennstoff werden Tausende oder Zehntausende Tonnen Erz abgebaut. In den Abbaugebieten in New Mexico (USA) und Wismut (in der ehemaligen DDR) lagern jeweils mehr als 100 Millionen Tonnen radioaktiver Abraum an der Oberfläche der Erde.

Die Wismut-Region ist so stark verstrahlt, dass dort die Bestimmungen der deutschen Strahlenschutzverordnung nicht angewandt werden. Der Uranbergbau in Ostdeutschland hat insgesamt etwa 8000 Halden und Schlammteiche hinterlassen. Regenwasser wäscht aus den Halden Uran, Radium und andere Schadstoffe aus, die ins Grundwasser gelangen. Bei Haldenrutschungen kommt es außerdem zur Freisetzung von strahlendem Staub in die Atmosphäre. Die Sanierungsarbeiten machen Fortschritte, werden jedoch noch bis 2015 dauern; Überwachungsmaßnahmen werden auch nachher noch erforderlich sein.

Die Verhältnisse in anderen Uranabbaugebieten sind vergleichbar. Diese Tatsachen werden von der Öffentlichkeit wenig beachtet, insbesondere wenn die Abbaugebiete in Ländern der Dritten Welt oder in weniger entwickelten Regionen von Industriestaaten liegen.

Normalbetrieb von Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen

Seit vielen Jahren wird die Frage einer erhöhten Krebshäufigkeit in der Nachbarschaft von Kernanlagen kontrovers diskutiert. Für die Wiederaufarbeitungsanlagen in La Hague und Sellafield gibt es zahlreiche Hinweise, die auf eine erhöhte Krebsrate hindeuten.

Auch bei Kernkraftwerken mehren sich die einschlägigen Befunde für gehäuftes Auftreten von Leukämie, Krebs und Down-Syndrom. Aktuelle Befunde liegen aus Deutschland und den USA vor.

Die Ursache für diese nach gängiger Sichtweise unerwarteten Ergebnisse könnte darin liegen, dass die Wirkung radioaktiver Niedrigstrahlung, insbesondere bei Inkorporation, bisher systematisch unterschätzt wurde, oder dass nicht sämtliche Emissionen zuverlässig von der Überwachung erfasst werden. Denkbar ist auch eine Kombination dieser beiden Faktoren. Für beide Erklärungen gibt es zunehmend schlüssige Hinweise.

Unsicherheit herrscht weiterhin hinsichtlich der Auswirkungen von Niedrigdosen auf das genetische Material, und damit hinsichtlich der Folgen heutiger Belastungen auf spätere Generationen, da die erforderlichen Beobachtungszeiträume viel größer sind. Im Sinne des Vorsorgeprinzips können auch aus diesem Grund Niedrigdosen nicht als umweltverträglich angesehen werden.

Das Sicherheitsproblem

Risiken der Art, wie sie Kernkraftwerke bei schweren Unfällen darstellen, werden von der Sozialwissenschaft primär dem Typ „Damokles“ zugeordnet: Geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, katastrophale Folgen. Im Fall der Kernenergie sind die Folgen grenzüberschreitend und lang anhaltend.

Seit Inbetriebnahme des ersten Kernkraftwerkes mussten die Sicherheitsbestimmungen aufgrund unvorhergesehener Unfälle ständig verschärft werden. Ein Gutteil der in Betrieb befindlichen Reaktoren erfüllt daher gegenwärtig nicht die von der IAEA empfohlenen Sicherheitskriterien. Aber auch die Methoden zur Erhebung des Sicherheitsstatus sind hinsichtlich ihrer Vollständigkeit und Zuverlässigkeit unzureichend.

Mit zunehmendem Alter der Kernkraftwerke und Verlust an infrastruktureller Kapazität steigt das Unfallrisiko. Die Liberalisierung des Energiemarktes verschlimmert die Lage, da nukleare Sicherheit teuer ist und das Streben nach Kostensenkung und höheren Aktienkursen zu Personalabbau führt und Investitionen in die Sicherheit gefährdet. In den letzten Jahren gibt es auch Fälle der Abschwächung von Sicherheitsnormen.

Eine Folge von Vorkommnissen in Kernkraftwerken in Europa, Amerika und Japan in den letzten Jahren haben zu besorgten Aufrufen der Nuklearindustrie zu mehr Selbstkritik und Sorgfalt - kurz verbesserter Sicherheitskultur - geführt. Obwohl es fraglich ist, ob diese Vorfälle schon dem Sicherheitsverlust durch die Liberalisierung des Strommarktes und der Alterung der Kernkraftwerke zugeschrieben werden können, zeigen sie doch deutlich, dass die Bemühungen um Sicherheitskultur und Sicherheitsmaßnahmen verstärkt werden müssen. Es ist schwer vorstellbar, wie dies bei den derzeitigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geschehen soll, wo die Kernenergie hinsichtlich Gesamtkosten trotz hoher Öl- und Gaspreise noch über anderen Stromerzeugungskosten liegt.

Für die kommende Generation von Reaktoren (Generation III) wurden die Konzepte modifiziert, um eine Reihe von vorhersehbaren Unfällen passiv beherrschen zu können („Inhärente Sicherheit“) und die Kernschmelzhäufigkeit zu reduzieren. Die „inhärente Sicherheit“ ist jedoch bisher weder erwiesen noch umfassend: Sie gilt a priori nur für Auslegungsstörfälle, nicht für externe Bedrohungen und keinesfalls gegenüber Terror- oder Kriegsakten. Die Liberalisierung des Strommarktes und die Kürzung der staatlichen Förderungen der Nuklearindustrie erzwangen eine Überarbeitung dieser Konzepte zur Senkung der Kapitalkosten (Generation III+).

International wird an der Konzeptentwicklung für die Generation IV – im Wesentlichen schnelle Reaktoren – gearbeitet, mit den erklärten Zielen inhärent sicher, proliferationsresistent, ökonomisch und frei von langlebigen hochradioaktiven Abfällen zu sein. Schnelle Reaktoren haben jedoch eine Reihe von Nachteilen, die sie in der Errichtung teuer und im Betrieb schwierig machen. An der Erreichbarkeit dieser Ziele werden daher beträchtliche Zweifel geäußert. Die auftretenden Sicherheitsprobleme unterscheiden sich stark von den Problemen, die aus den früheren Generationen bekannt sind. Allerdings ist es sehr schwierig deren Sicherheit heute einzuschätzen, da sie sich erst in der Konzeptphase befinden und es nur sehr wenige Studien über Sicherheitsaspekte gibt.

Wegen der begrenzten Vorkommen spaltbaren Urans – die Schätzungen liegen je nach Annahmen hinsichtlich des Ausbaus der Kernenergie und der Uranvorkommen zwischen wenigen Jahrzehnten und einem Jahrhundert – muss bei einem substantiellen und langfristigen Einstieg in die Kernenergie auf die Anwendung schneller Reaktoren übergegangen werden. Dies brächte einen Einstieg in die Plutoniumwirtschaft mit sich.

Katastrophen sind komplexen und gekoppelten Systemen inhärent und daher unvermeidbar, wiewohl die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen reduziert werden kann. Kernenergieerzeugung erfordert sehr komplexe und gekoppelte Systeme mit anspruchsvollen Sicherheitskonzepten, wie etwa Diversität, Redundanz und Mehr-Barrieren-System (defense-in-depth). Letztere tragen aber auch selber zur Erhöhung der Verletzlichkeit bei; es geht also um ein schwieriges, nicht befriedigend lösbares Optimierungsproblem. Enorme Energien, auf kleinem Raum konzentriert, zusammen mit gefährlichen Substanzen in Mengen, die zur Kontamination großer Gebiete mit persistentem radioaktiven Material ausreichen, können grundsätzlich weder hinreichend sicher eingeschlossen werden, noch in ihrer Handhabung gegen den menschlichen Faktor sicher gemacht werden. Aufgrund zwingender physikalischer Gesetze können unfallauslösende Kausalketten durch physische Einschlüsse und technische Strukturen nie vollständig beseitigt werden, noch können die evolutionären biologischen Beschränkungen der menschlichen Natur durch administrative, rechtliche oder psychologische Sicherheitsmaßnahmen aufgehoben werden.

Das Problem der Endlagerung

Das Problem der Endlagerung hoch- und mittelradioaktiver (konzentrierter) Abfälle ist nicht gelöst. Drei Konzepte – keines derzeit noch umsetzbar – stehen zur Diskussion:

1. Die zugängliche Aufbewahrung, bei welcher der Zustand des gelagerten Materials überprüft werden kann und ggf. weitere Maßnahmen möglich sind.
2. Die permanente, nicht kontrollierte Lagerung, die Missbrauch sehr erschwert und keine „Bewachung“ erfordert, bei der aber auch nur sehr eingeschränkte Information über die Situation im Endlager etc. vorliegt und keine korrigierenden Eingriffe möglich sind.
3. Die Abtrennung und Transmutation der langlebigen radioaktiven Komponenten zur Reduktion der gefährlichen Zeitperiode auf höchstens 1000 Jahre; Lagerung über diesen Zeitraum.

Keine der genannten Optionen für die Endlagerung erfüllt, soweit heute absehbar, die Forderungen nach Sicherheit und sozialer Verträglichkeit.

Bei der geologischen Lagerung stößt die Naturwissenschaft an ihre prognostischen Grenzen. Das radioaktive Material könnte zu einem in der fernen Zukunft liegendem Zeitpunkt in die Biosphäre gelangen, in der die Menschheit damit noch weniger umzugehen weiß als heute. Bei der kontrollierten Lagerung an oder nahe der Oberfläche werden die Grenzen der Vorhersehbarkeit der gesellschaftlichen Entwicklung erreicht. Aufgrund der langen Zeiträume, für die ein Sicherheitsnachweis zu führen wäre, erscheint es prinzipiell kaum denkbar, dass so oder so eine ausreichende Sicherheit garantiert werden kann.

Bei der Abtrennung und Transmutation bestehen offene Fragen bezüglich der Sicherheit und Umweltbelastung. Hinzu kommen Zweifel an der grundsätzlichen Machbarkeit und auch der Finanzierbarkeit.

Nach mehreren Jahrzehnten der Kernenergienutzung kann der Industriezweig noch immer kein sozial, technisch und ökonomisch akzeptiertes Endlagerkonzept präsentieren. Statt dessen wächst die Anzahl der Zwischenlager, wie auch derjenigen Kernanlagen, die vor ihrem Abriss stehen. In einer Vielzahl von Betreiberstaaten sind selbst die erforderlichen Kapitalmengen für Abriss und Zwischenlagerung nicht ausreichend angespart worden.

Die Frage nach der Rechtfertigung weiterer Produktion von hochradioaktiven Abfällen stellt sich daher. Für die bereits vorhandenen radioaktiven Abfälle muss im gesellschaftlichen Konsens jene Lösung gefunden werden, die mit den geringsten Nachteilen verbunden ist. Ein Ausstieg aus der Kernenergie würde die zur entsorgende Menge an Abfall begrenzen und so zur Minimierung der Nachteile beitragen.

Schwach radioaktive Abfälle werden nur zum Teil der Endlagerung zugeführt. Große Mengen werden aus Kostengründen einfach freigesetzt. Die resultierenden Niedrigdosis-Belastungen stehen in Widerspruch zum Prinzip der Gesundheitsvorsorge. Dieser Weg der „Entsorgung“ von Reststoffen, die Strahlung unterhalb von festgelegten Aktivitätsgrenzwerten emittieren, ist nicht umweltverträglich.

Auch Transport, Zwischenlagerung und Wiederaufarbeitung radioaktiver Abfälle sind mit erheblichen Gefahren verbunden.

Terror und Kriegsgefahr

In der derzeitigen politischen Situation und aufgrund steigender Weltbevölkerung, schwindender Ressourcen, der klimatischen Bedrohung und zunehmender Ungleichverteilung ist mit wachsender militärischer und terroristischer Aktivität zu rechnen. „Kleine“, lang andauernde und regional begrenzte Kriege, präemptive Schläge und Interventionskriege gegen Länder von denen eine tatsächliche, perzipierte oder behauptete Bedrohung ausgeht, nehmen zu. In sich unterlegen fühlenden Staaten kann unter diesen Bedingungen Terrorismus geweckt oder verstärkt werden. Anlagen mit großem Katastrophenpotential stellen verlockende – da ergiebige – Ziele für Sabotage, terroristische und militärische Angriffe dar. Es gibt keinen verlässlichen Schutz gegen derartige Bedrohungen.

Besonders bedroht sind Kernkraftwerke – auch die fortschrittlichsten, künftigen, sogenannten „inhärent sicheren“ Reaktoren. Die Wahl eines Kernkraftwerkes als Angriffsziel könnte aus folgenden Gründen bzw. aus einer Kombination dieser Gründe erfolgen:

- Wegen des Symbolcharakters: Kernenergie kann als Inbegriff technologischer Entwicklung, als typische „Hightech“ gesehen werden. Zudem handelt es sich bei Kernanlagen um eine Technik mit zivil/militärischem Doppelcharakter.

- Wegen der langfristigen Wirkung: ein Angriff kann zu weiträumigen radioaktiven Kontaminationen mit langlebigen Radionukliden führen. Die sozialen und volkswirtschaftlichen Folgen für betroffene Staaten bzw. Staatengruppen lassen sich kaum ermessen.
- Wegen der unmittelbaren Wirkung auf die Elektrizitätserzeugung in der betroffenen Region: Kernkraftwerke sind, wo immer sie betrieben werden, wichtige Bestandteile der Stromversorgungssysteme und speisen mit hoher Leistung ins Netz ein. Der schlagartige Ausfall einer solchen Großanlage kann unter Umständen zu Netzzusammenbrüchen führen.
- Wegen der psychologischen Auswirkung in anderen Staaten, in denen ebenfalls Kernkraftwerke betrieben werden: ein erfolgreicher Angriff gegen ein Kernkraftwerk hätte möglicherweise weitreichende Auswirkungen auf die Nuklearindustrie auch in anderen Staaten.

Ähnliches gilt für Angriffe auf andere kerntechnische Anlagen oder auf Atomtransporte.

Zahlreiche dokumentierte Versuche von Sabotage, terroristischen und militärischen Angriffen auf kerntechnische Anlagen belegen bereits eindrucksvoll die Realität dieser Gefährdung.

Die Verwundbarkeit von kerntechnischen Anlagen gegenüber Terror und Krieg kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Alle Arten von kerntechnischen Anlagen, sowie Transporte radioaktiver Substanzen sind gegenüber Terrorangriffen und Kriegseinwirkungen verwundbar. Schwerwiegende Freisetzungen mit katastrophalen Folgen können erzielt werden.
- Ein Angriff auf ein Kernkraftwerk kann zu radioaktiven Freisetzungen führen, die ein Mehrfaches jener beim Tschernobyl-Unfall erreichen. Umsiedlungen auf großen Flächen können erforderlich werden, die Zahl der Krebstoten kann dramatisch zunehmen.
- Das Spektrum der Bedrohung ist außerordentlich vielfältig und Schutzmaßnahmen gegen Terror-Angriffe und kriegerische Einwirkungen sind nur in sehr begrenztem Maße möglich. Teilweise geraten denkbare Maßnahmen in Widerspruch zu den Grundwerten einer offenen, demokratischen Gesellschaft.

Auch unter dem Gesichtspunkt der Verwundbarkeit gegenüber terroristischen und kriegerischen Angriffen zeigen sich somit klare Nachteile einer zentralisierten, nicht nachhaltigen Technologie wie der Kernenergie.

Katastrophenschutz

Die notwendigen Maßnahmen zur Minimierung des Schadens im Falle eines Kernkraftwerksunfalles und die unvermeidbaren Folgen eines schweren Unfalles belegen, dass die Kernenergie weder umwelt- noch sozialverträglich ist. Diese Problematik hat sich in den letzten Jahren mit der steigenden Gefahr von Terroranschlägen und Kriegseinwirkungen auf Kernanlagen noch verschärft.

Bei einem schweren Unfall kann ein nennenswerter Teil der radioaktiven Komponenten des Reaktorkerns in die Atmosphäre gelangen. Die Vorwarnzeit, die für Maßnahmen des Katastrophenschutzes zur Verfügung steht, ist eventuell sehr gering.

Die Strahlenbelastung der Bevölkerung kann zu akuten Strahlenschäden führen, jedenfalls ist aber davon auszugehen, dass wesentliche Teile der Bevölkerung von den Langzeitwirkungen (Krebs und andere Erkrankungen, sowie Veränderungen des Erbgutes) betroffen sind. Evakuierungen und Umsiedlungen können zu weiteren schwerwiegenden Belastungen der betroffenen Menschen führen.

Um für den Ernstfall vorbereitet zu sein, ist eine Vielzahl der unterschiedlichsten Maßnahmen seitens der öffentlichen Hand erforderlich. Frühwarn- und Alarmsysteme müssen eingerichtet und betrieben werden, für Bevorratung und Evakuierung sind Pläne zu erstellen, Vorkehrungen für Dekontamination und Behandlung von Strahlenopfern sind zu treffen und vieles andere mehr. Dies sind laufende Aufwendungen und Kosten, die in der Regel nicht den Kosten der Kernenergie zugerechnet werden.

Sie müssen notgedrungenen Maßen auch von Staaten erbracht werden, auf deren Gebiet keine Kernkraftwerke oder andere Nuklearanlagen betrieben werden.

In den letzten Jahren gibt es internationale Bemühungen, den Katastrophenschutz zu verbessern. Sie zielen sowohl auf die Entwicklung von Prognosemodellen und anderen Entscheidungshilfen für den Fall schwerer Freisetzungen, als auch auf die Zusammenstellung von allgemeingültigen, grundlegenden Anforderungen an Vorausplanung und Reaktion bei einem Nuklearen Notfall. Hier hat sich die IAEO verdient gemacht. Diese Anstrengungen gehen zweifellos in die richtige Richtung, können jedoch auch keine tragfähige Lösung liefern. Selbst bei optimaler Planung für den Katastrophenschutz muss man davon ausgehen, dass die rechtzeitige Umsetzung vieler Maßnahmen aufgrund der kurzen Vorwarnzeiten und der zu erwartenden Unsicherheit hinsichtlich des Unfallverlaufes und –ausmaßes nicht möglich ist. Genauer betrachtet zeigen diese Anstrengungen nur die Hilflosigkeit angesichts nuklearer Katastrophen.

Nukleare Proliferation

Der kommerzielle nukleare Brennstoffzyklus bietet zwei primäre Wege zur Proliferation: von Wiederaufarbeitungsanlagen über hochangereichertes Uran (HEU) und von abgebrannten Brennelementen über reaktortaugliches Plutonium, das grundsätzlich auch waffentauglich ist.

Von frischem, niedrig angereichertem Reaktorbrandstoff (3,5 % Uran 235) kann hochangereichertes Uran (90 %) sehr rasch gewonnen werden, weil bei über 3,5 % Anreicherung etwa 80 % des für die Anreicherung erforderlichen Aufwandes bereits getätigt sind.

Waffen aus Reaktorplutonium neigen zu vorzeitiger Detonation sodass sie in der Regel nicht die volle Wirkung einer aus Waffenplutonium hergestellten Bombe erreichen können – bis hinunter zur sogenannten „Fizzle“ Wirkung. Aber selbst die minimal erwartete „Fizzle“ Wirkung einer Implosionswaffe aus Reaktorplutonium läge in der Größenordnung einer Kilotonne TNT-Äquivalent. Das ist 4000 mal mehr als die Explosionskraft einer typischen, konventionellen militärischen 500-Pfund Bombe. Im Stadtgebiet zur Explosion gebracht, hätte eine solche Bombe verheerende Folgen.

Die technischen Fähigkeiten subnationaler Gruppen dürften ausreichen, um Kernwaffen aus Reaktorplutonium zu konstruieren. Die Wiederaufarbeitungstechnologie ist in der frei zugänglichen Literatur ausführlich beschrieben. Sogar schon Mitte der 80er Jahre war dies ausreichend, um drei amerikanischen Hochschulabsolventen die Erarbeitung von Konstruktionsplänen einer 15-Kilotonnen Implosionswaffe mit dem Aufwand von nur zwei Personenjahren zu ermöglichen. Die Mittel, die zur Extraktion der erforderlichen Plutoniummengen aus abgebrannten Brennelementen erforderlich sind, sind relativ bescheiden; eine kleine, gut vorbereitete Gruppe von etwa 6 Personen kann dies in etwa zwei Monaten bewältigen.

Keine andere Technologie zur Strom- oder Prozesswärmeerzeugung (z.B. auf der Grundlage von Kohle, Öl, Gas, Wasserkraft, Windenergie, Solarenergie, Biomasse) ist mit derartigen Proliferationsproblemen verbunden. Das Proliferationspotential des kommerziellen Brennstoffzyklus ist unvermeidbar bei der gegenwärtigen, und noch viel ausgeprägter bei den neuen, absehbaren Technologien. Selbst im besten Fall beschreiben die Proponenten neuer Technologien diese als proliferations-„resistent“, nicht proliferations-„sicher“. Das Risiko kann reduziert, aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Rechtzeitige Verfügbarkeit der Kernenergie

Jede Option, die zur Erreichung der Kyoto-Ziele einen Beitrag leisten soll, muss spätestens in der Zeit zwischen 2008 und 2012 wirksam werden. Für die Zeiträume bis 2020 und 2050 sind weitere, noch viel einschneidendere Treibhausgasemissionsreduktionen in Diskussion. Für den wachsenden Bedarf an Elektrizität und in Hinblick auf die Verknappung von Erdöl könnten zusätzliche Energiequellen in etwa demselben Zeitraum benötigt werden. Engpässe in mehreren Bereichen machen es unwahrscheinlich, dass Kernenergie, selbst wenn sie forciert würde, in der Lage wäre, innerhalb dieser Zeitspanne einen wesentlich erhöhten Beitrag zu liefern:

- Sehr kurzfristig kann die Kernenergie nur durch Verlängerung der Lebensdauer bestehender Kernkraftwerke auf den erhöhten Bedarf und die Forderung nach Reduktion der Treibhausgasemissionen reagieren. Damit schafft sie aber keine neuen Kapazitäten sondern verzögert lediglich den Verlust vorhandener.
- Der für den nennenswerten weiteren Ausbau der Kernenergie u. a. notwendige Übergang zu so genannten „inhärent sicheren“ Reaktoren ist nicht zeitgerecht möglich; der für die Entwicklung und Erprobung anzusetzende Zeitraum beträgt mindestens 12 Jahre.
- Für einen bedarfsorientierten Ausbau der Kernenergie wird Expertise und Arbeitskraft benötigt, die rechtzeitig und in ausreichendem Umfang nicht bereitgestellt werden können. Schon jetzt ist ein Engpass bei geschultem Personal in einigen Betreiberstaaten festzustellen.
- Selbst wenn diese Hindernisse überwunden werden könnten, setzte die absehbare Verknappung des (billigen) spaltbaren Urans dem Beitrag der Kernenergie Grenzen. Erst die als übernächste Generation vorgesehenen schnellen Reaktoren werden von spaltbarem Uran unabhängig, führen aber nach derzeitigen Vorstellungen in eine Plutoniumwirtschaft.
- Notwendige Entwicklungen um der Endlagerung des vermehrt anfallenden hoch radioaktiven Abfalls Akzeptanz zu verschaffen und negative Auswirkungen hintan zu halten, sind nicht abzusehen.

Sollte Kernenergie *längerfristig* eine nicht vernachlässigbare Rolle bei der Reduktion von CO₂-Emissionen spielen, müsste sie in einem Maß ausgebaut werden, das mindestens dem zu erwartenden Anstieg des Verbrauches an fossilen Energieträgern entspricht. Dies würde eine Ausbaurate erforderlich machen, die wesentlich höher liegt, als dies im „goldenen Zeitalter“ der Kernenergie, also in den 70er und 80er Jahren der Fall war. Ein solcher Ausbau wäre auch bei unterstellter Akzeptanz nicht zeitgerecht möglich, da die Infrastruktur zur Produktion der Anlagen nicht ausreichend verfügbar wäre, die Produktion der Anlagen von den entsprechenden Staaten nicht finanziert werden könnte, und die gleichzeitig nötige strukturelle Änderung des Energieverbrauchs-Mix hin zu elektrischem Strom Änderungsraten erforderlich machten, die deutlich über den historischen Veränderungen in diesem Bereich liegen.

Internationaler rechtlicher Rahmen

Viele der dargelegten strukturellen Probleme und Gefahren verlangen förmlich nach internationaler Kooperation, um wenigstens ihre potenziell grenzüberschreitenden Auswirkungen zu reduzieren. Trotz einiger Initiativen und Absichtserklärungen lässt eine Analyse der einschlägigen völkerrechtlichen und gemeinschaftsrechtlichen Dokumente aber vermuten, dass die Betreiberstaaten bemüht sind, konkrete völkerrechtliche und gemeinschaftsrechtliche Verpflichtungen und Kontrolleinrichtungen zu verhindern; ihre exklusive Kompetenz in allen Regelungsbereichen bleibt daher auch unangetastet. Die Dokumente beschränken sich ganz bewusst auf die Erarbeitung von nahezu selbstverständlichen Leitprinzipien und überlassen die Detailregelungen den nationalen Rechtsordnungen. Diese Haltung und Vorgangsweise erweist sich bei näherer Analyse als zusätzliche Verstärkung des aufgezeigten Problem- und Gefährdungspotentials.

Energiepolitische Perspektive

Unter alternativen Lösungen versteht man Konzepte, die den Prinzipien der Nachhaltigkeit entsprechen, und daher frei von Katastrophenpotenzial, flexibel, durchschaubar, etc. sind.

- Alternative Lösungen im engeren Sinne sind solche, welche Energieflüsse nützen statt begrenzte Ressourcen zu verbrauchen und die den Kriterien für nachhaltige Technik (s.o.) genügen. Beispiele für derartige Lösungen sind die passive Solarenergie- oder Biomassenutzung.
- Als alternative Lösungen im weiteren Sinne sind – als Übergangslösung – Techniken zu verstehen, welche eine wesentliche Reduktion der Schadwirkungen bzw. Steigerung der Nutzungseffizienz bewirken, wie z.B. die Kraft-Wärme Kopplung.

Die Kernenergie zählt nicht zu den alternativen Lösungen in der Energieerzeugung.

Ein wesentlicher Beitrag zur Minderung des Energiebedarfes und damit zur Lösung der Treibhausproblematik wird in der Dienstleistungsorientierung der Energiebereitstellung gesehen. Die Kernenergie ist nicht dienstleistungsorientiert.

Die Kernenergie erweist sich auch als vergleichsweise teure Maßnahme zur Reduktion von Treibhausgasemissionen: Energieeffizienzmaßnahmen, erneuerbare Energien und alternative Lösungen im weiteren Sinn ersetzen jeweils 2,5 bis 10 mal soviel CO₂ pro Investitionseinheit.

Während man zunächst nach alternativen Lösungen in der Energieerzeugung suchte, wird nun zunehmend deutlich, dass es vor allem um Alternativen zur Energieerzeugung geht (z.B. Energieeffizienzsteigerung oder Vermeidung des Bedarfs durch intelligente Planung, z.B. im Gebäude- oder Städtebaubereich).

Wäre die Energieintensität der Welt historisch mit etwa 1,2 % statt 1 % pro Jahr gesunken, so hätte dies die gesamte Kernenergieproduktion der Welt aufgewogen. Eine Verdopplung der Rate auf 2 %, was mittels Einsatz entsprechender energiepolitischer Maßnahmen durchaus machbar erscheint, würde den Energieverbrauch der Welt vom weltweiten Wirtschaftswachstum entkoppeln. Dies könnte durch eine Politik der „wahren Preise“ (Internalisierung der externen Kosten) statt einer Politik der möglichst billigen Energie erreicht werden.

Die Reduktion der CO₂-Emission durch Einsatz von Kernenergie und andere CO₂-arme Energiebereitstellungsverfahren war in der Vergangenheit nur ein Bruchteil jener Reduktion an CO₂-Emissionen, die Effizienzsteigerung und Struktureffekte gebracht haben.

Daraus folgt: Kernenergie hat das Potential, die Folgen des mit dem erwünschten Wirtschaftswachstum gekoppelten Energieverbrauchszuwachses geringfügig zu dämpfen. Energieeffizienzsteigerung hat das Potential den Energieverbrauchszuwachs zu vermeiden – und damit eine weltweit erfolgreiche Klimapolitik einzuleiten.

Es gibt Studien, die zeigen, dass die Kyoto-Ziele sogar mit Ausstieg aus der Kernenergie erreichbar sind, wenn der politische Wille dazu vorhanden ist. Selbst die langfristig von der EU angestrebte Stabilisierung der Temperatur auf global +2 °C ist ohne Kernenergie erreichbar. Bei diesen Szenarien wird allerdings von der Sequestrierung (Bindung oder Lagerung z.B. in ausgeförderten Erdgaslagerstätten) nennenswerter Mengen von CO₂ oder von einer deutlichen Abflachung der Energienachfrage ausgegangen.

Wirtschaftliche Perspektive

Selbst wenn man nur die Energieaufbringungsseite betrachtet ist der vermehrte Einsatz von Kernenergie auch vom wirtschaftlichen Standpunkt kein geeignetes Mittel, Klimaschutz zu betreiben:

In einem deregulierten, wirtschaftlich kompetitiven Markt wollen Stromerzeuger in profitable Optionen investieren, deren technische, ökonomische und politische Risiken gering, jedenfalls aber relativ gut einschätzbar sind. Kernkraftwerke gelten als riskante Investitionen wegen der anhaftenden politischen Risiken (Akzeptanzprobleme), der technischen Risiken in Zusammenhang mit Sicherheit und Endlagerung und der wirtschaftlichen Risiken aufgrund der hohen Fixkosten zu Beginn, der langen und schwer abschätzbaren Bauzeiten und Errichtungskosten und der Haftung bei Dekommissionierung und Abbau der Anlagen.

Auf Basis der derzeitigen Kosten (Planung, Bau und Betrieb) ist Strom aus Kernkraftwerken verglichen mit dem aus Kohle- und Gaskraftwerken teuer. Erst bei Anhalten der hohen Ölpreise (über 30 US\$/B) über die Betriebsdauer von 30 bis 40 Jahren oder wenn man für Projektionen beträchtliche, aber nicht unplausible Kostenreduktionen in allen Bereichen der Kernenergie, nicht aber bei fossiler Energie unterstellt, dann erreicht nuklearer Strom das Kostenniveau von Kohlekraftwerken und Gaskraftwerken, hohe bis mittlere Gaspreise vorausgesetzt. Energieeffi-

zizienzsteigerungen (Senkung der Energieintensität der Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen) sind sowohl kostenmäßig als auch bezüglich ihres CO₂-Einsparungspotentials günstiger als jede Art der zusätzlichen Bereitstellung von Energie.

Dass der Bau neuer Kernkraftwerke zusätzlicher Anreize bedarf, ersieht man auch aus den wenigen in Bau befindlichen oder in Auftrag gegebenen Anlagen in Europa (Finnland) und den USA: Staatliche Kreditgarantien, besonders niedrige Prototyppreise, Steuerkredite, Unterstützungsrahmen für Kosten aufgrund von Genehmigungsverzögerungen, Unterstützung bei Entsorgungskosten, usw. wurden angeboten.

Externe Kosten und Regulierungsbedarf sind bei der Kernenergie vielfältig und im Vergleich zu anderen Energieerzeugungsformen hoch: Auf nationaler Ebene spezielle Genehmigungs- und Überwachungsbehörden, kontinuierliches Radioaktivitätsmonitoring und aufwendige Katastrophenvorsorge, auf internationaler Ebene insbesondere die Überwachung gegen den Missbrauch spaltbaren Materials (z.B. Safeguards, CTBTO). Die Kosten für diese Leistungen, ebenso wie die Kosten aus Umweltschäden aus dem Gesamtbrennstoffzyklus sind in den meisten Kostenrechnungen für Kernenergie nicht enthalten. Auch die groß angelegte europäische Vergleichsstudie ExternE berücksichtigt diese externen Kosten bei der Kernenergie nicht. Als Subvention für die Kernenergie und daher wettbewerbsverzerrend müssen auch die Regelungen hinsichtlich der Kosten für die Dekommissionierung und das Abfallmanagement gelten, und die Tatsache, dass die Haftung für Schäden aus Kernkraftwerksunfällen teilweise vom Betreiberstaat, teilweise von den Mitgliedsstaaten internationaler Konventionen übernommen wird, und darüber hinaus gedeckelt ist. Es wurde z.B. abgeschätzt, dass eine private Versicherung ohne Deckelung der Haftung die Erzeugungskosten in französischen Kernkraftwerken verdreifachen würde.

Wasserstoff ist kein Ausweg

Wasserstoff ist keine primäre Energiequelle – sondern ein Energieträger, der unter Verwendung einer anderen primären Energiequelle (Kernenergie, Windenergie, Photovoltaik, Biomasse, usw.) hergestellt werden muss. Für die Wasserstoffproduktion und die Komprimierung oder Verflüssigung zum Zweck der Lagerung und der Verteilung ist Energie erforderlich. Die Gesamteffizienz dieser zentralisierten Wasserstoffwirtschaft ist niedrig, die Wasserstoffproduktionsverfahren mit wenigen Ausnahmen nicht ausgereift.

Eine zentralisierte Wasserstoffproduktion in großem Maßstab, die Lagerung und die Verteilung sind mit Risiken schwerer chemischer Unfälle verbunden; eine dezentrale, „verbrauchsnahe“ Wasserstoffwirtschaft wird gerade erst erforscht. Die Untersuchung der Sicherheitsimplikationen und der terroristischen Bedrohung einer Wasserstoffwirtschaft, insbesondere des Wasserstofftransportes, haben eben erst begonnen.

Die erforderliche Menge an Wasserstoff für eine Wasserstoffwirtschaft für leichte Personenkraftwagen in den 25 EU-Staaten liegt in der Größenordnung von 23 Millionen metrischen Tonnen pro Jahr. Das ist etwa die Hälfte der gegenwärtigen Weltproduktion. Die Kosten für Produktion dieser Wasserstoffmenge würden im Bereich von 250-500 Milliarden € liegen und z.B. größenordnungsmäßig sechzig EPR-Kernkraftwerke erfordern.

Die Untersuchungen zu den Umweltproblemen in Zusammenhang mit der Wasserstoffwirtschaft, z.B. den Einfluss des in die Atmosphäre freigesetzten gasförmigen Wasserstoffs, laufen gerade erst zögerlich an.

Es ist derzeit schwer zu sehen, wie Wasserstoff – nuklear oder nicht-nuklear – einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Schließung der entstehenden Energielücke leisten könnte; keinesfalls kann er eine rasche Lösung darstellen.

Rechtliche Dimension der Nachhaltigkeit

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ nach der Brundtland-Formel ist im völkerrechtlichen Sinn nicht so klar definiert, dass er ohne Konkretisierung auf spezifische Problemstellungen angewandt werden könnte. Das heißt, er muss in der konkreten Situation um zusätzliche Wert- und Zielentscheidungen angereichert werden.

Ein Kern des Nachhaltigkeitsprinzips liegt in einer erweiterten Verteilungsproblematik, nämlich der Verteilung zwischen der gegenwärtigen und zukünftigen Generationen. Auf Kernenergie angewandt heißt dies, dass es um die Verteilung der Ressource Umwelt und der mit der Kernenergie verbundenen Lasten zwischen den Generationen geht.

Das Verhältnismäßigkeitsgebot des Rechtes der Europäischen Gemeinschaft könnte für den hier interessierenden Themenbereich der Energieversorgung so interpretiert werden, dass der Energiebedarf der gegenwärtigen Generation so gering wie möglich zu halten ist, dass er mit einem möglichst geringen Aufwand an Ressourcen und Eingriffen in die Umwelt zu befriedigen ist. Nach den Grundsätzen der Kostenwahrheit und des Verursacherprinzips sind die Lasten der Energiegewinnung ausschließlich von jenen Generationen zu tragen, die sich ihrer bedienen.

Es gibt im besonderen Völkerrecht (spezifische von völkerrechtlichen Verträgen getragene Rechtsbereiche) und auch im Gemeinschaftsrecht viel versprechende Ansätze mit durchaus plausiblen Verfahrensstrukturen, das Nachhaltigkeitsprinzip direkt anwendbar zu machen. Allerdings bedarf es auch hier der entsprechenden Konkretisierung im Einzelfall, um entsprechende Rechtsfolgen zu erzielen.

Das (IAEO-)Übereinkommen über die Nukleare Sicherheit ist zehn Jahre nach Tschernobyl und rund 40 Jahre nach der Inbetriebnahme der ersten Kernkraftwerke in Kraft getreten. Konkrete Sicherheitskriterien enthält es nicht, das Übereinkommen begnügt sich mit Sicherheitsgrundsätzen. Die Rechtssetzungsautonomie der Betreiberstaaten bleibt unangetastet. Eine Kontrolle der Einhaltung der Sicherheitsgrundsätze beschränkt sich auf ein System der Berichterstattung an eine Tagung der Vertragsparteien, die alle drei Jahre stattfindet.

Die Versuche der EU-Kommission, im Bereich der EAG die Sicherheitserfordernisse gemeinschaftsweit zu standardisieren, sind bislang gescheitert, obgleich auch sie, wie das (IAEO-) Übereinkommen nur allgemeine Grundsätze enthielten. In der ersten Version gab es auch noch ein im Ansatz erfolversprechendes Kontrollsystem und Vorkehrungen für die gemeinschaftsweite geordnete Entsorgung stillzulegender Kernkraftwerke. Der eigentliche Fortschritt dieses Entwurfes wäre die Implementierung der Gemeinschaftszuständigkeit für nukleare Sicherheit gewesen.

Für die Entsorgung still gelegter Kernkraftwerke muss Schätzungen der EU-Kommission zufolge mit einem finanziellen Aufwand von etwa 15 % der Gesamtinvestitionskosten oder in absoluten Zahlen zwischen 200 Millionen und 1 Mrd. Euro gerechnet werden. Diese Kosten entstehen erst nach Stilllegung, das heißt nach Wegfall der Einnahmen. Bei einer angenommenen Betriebsdauer eines Kernkraftwerkes von 40 Jahren bedeutet dies, dass die Kosten auf eine Generation verlagert werden, die das stillgelegte Kernkraftwerk gar nicht mehr nutzen kann.

Die Sicherung von Endlagerstätten auf die nächsten 10 000 Jahre ist eine Überforderung aller erdenklichen gesellschaftlichen Regelungsstrukturen. Die politische Führung der Betreiberstaaten ist gefordert, hoch komplexe, kollektive Willensbildungs- und Entscheidungsstrukturen heute über etwa zwei Mal den Bogen der bisherigen Menschheitsgeschichte zu projizieren!

Bei näherem Hinsehen erweist sich aber das 10 000 Jahr-Limit als willkürliche Annahme. Die Halbwertszeit von zahlreichen zu deponierenden Elementen liegt weit darüber – die von Jod-129 liegt z.B. bei 16 Millionen Jahren. Der United States Court of Appeals für den District of Columbia Circuit hat mit Urteil vom 9. Juli 2004 die Entscheidung der zuständigen US-Bundesbehörden für das Yucca Mountain-Massiv als bundesweites Endlager für Nuklearabfälle aufgehoben, weil das 10 000 Jahr-Limit zu kurz greift.

Aus rechtlicher Sicht schließt daher das Nachhaltigkeitsprinzip unter Berücksichtigung der Grundsätze der Kostenwahrheit und des Verursacherprinzips die Verwendung der Kernenergie in der Form der verfügbaren und heute absehbaren Konzepte aus.

Zur Einstimmung: Energiewende – vom Öl zur Sonne

Peter Weish
April 2006

Zur Einstimmung: Energiewende – vom Öl zur Sonne

Peter Weish

April 2006

Perspektive der Erdölproduktion

Die Ära des Erdöls

Das Zeitalter des Erdöls ist etwa 100 Jahre alt. Billiges, reichliches Erdöl hat sich in vielen Bereichen dramatisch manifestiert: Riesige Siedlungs- und Industrieballungen, gigantische Verkehrssysteme. Billige Energie bedeutet auch billige Materialien wie Kunststoffe, Stahl, Aluminium oder Glas. Die Folge war eine zuvor nicht vorstellbare Verschleiß- und Wegwerfwirtschaft. Die Industrialisierung der Landwirtschaft hat eine totale Abhängigkeit der Lebensmittelproduktion vom Erdöl gebracht.

Die weltweite Erdölproduktion hat derzeit einen Höchstwert erreicht. Man spricht von „Peak Oil“. *„Wir haben heute die Hälfte dessen, was vorhanden ist, gefördert und kennen 90 % aller Erdölvorkommen. Wir produzieren heute 22 Gigabarrel (Gb) pro Jahr, aber finden nur 6 Gb pro Jahr. Deshalb können wir sagen, heute finden wir pro vier Barrel, die wir konsumieren, nur noch ein Barrel neu. Die gegenwärtige Rate der Erschöpfung der Erdölfelder liegt bei 2 % pro Jahr.“* [Campbell 2000]

Das Ende der Ära billigen, reichlichen Erdöls ist absehbar

Die Nachfrage wächst, nicht zuletzt in China, die Förderleistung ist nicht mehr beliebig steuerbar. Wenn die Nachfrage die Förderleistung übersteigt – das kann sehr bald der Fall sein – sind empfindliche, dauerhafte Preissteigerungen unvermeidlich.

„Die nächsten Jahre bis zum Erreichen des weltweiten Fördermaximums für Erdöl wird es wahrscheinlich noch eine Serie von heftigen Preisausschlägen nach oben und nach unten geben. Erst nach dem Überschreiten des Fördermaximums wird die Instabilität der Ölpreise wohl beendet sein. Der Markt spiegelt dann die langfristigen Knappheiten wieder. Das Ölpreisniveau wird deutlich höher sein, als heute.“ [Schindler und Zittel 2000]

Der Erdölpreis zieht den Gaspreis nach. Die Folgen sind hohe Energiekosten der Verbraucher, vor allem für Heizung und Elektrizität, aber letztlich werden die meisten Waren teurer.

Die kurzsichtige gesellschaftspolitische Reaktion

Menschen, die den hohen, laufend gesteigerten Energieverbrauch der letzten Jahrzehnte als Selbstverständlichkeit betrachten, werden nach Ersatz rufen und möglichst so weitertun wollen, wie bisher. Das gleiche gilt für viele Bereiche in der Wirtschaft, die in den letzten Jahrzehnten von billiger Energie und billigen Rohstoffen abhängig wurden.

Die Folge ist eine aufbringungsorientierte Energiepolitik, die nach neuen Energieträgern und neuen Kraftwerkskapazitäten ruft.

Um eine hohe Nachfrage nach fossilen Brennstoffen abdecken zu können, sind enorme Investitionen in die weitere Erschließung und Förderung von Erdöl und „nichtkonventionellen“ Energieträgern erforderlich. Ölbohren im Meer, Förderung von Ölsanden etc. bedeutet neben Umweltzerstörung und hohen Kosten auch eine schlechte Energiebilanz.

Kernenergie

Wie das Beispiel USA zeigt, werden Investitionen in Rüstung und Propaganda getätigt, um in der absehbaren scharfen Konkurrenz um die knapper werdenden Vorräte Konflikte gewalttätig (Krieg) austragen zu können.

Mit der Verteuerung von Erdgas verliert die Atomkraft ihre billigere Konkurrenz und wird als wirtschaftlich propagiert. Atomkraft wird darüber hinaus wegen ihrer (vermeintlichen) CO₂-Freiheit als Ausweg aus der Klimaproblematik angepriesen, der sie jedoch aus mehreren Gründen nicht sein kann. Selbst wenn man von den unvermeidlichen Gefahren der Atomkraft absieht, kann sie keine Alternative zum Öl sein, weil sie von erschöpflichen Uranerzen abhängig ist.

Jan-Willem Storm van Leeuwen and Philip Smith fassen ihre detaillierten Berechnungen zusammen: *„Am Ende des Weges und unter günstigsten Bedingungen verursacht die Nutzung der Atomkraft ungefähr ein Drittel der CO₂-Emissionen der gasbefeuerten Elektrizitätsproduktion. Die zur Erzielung dieser Reduktion erforderlichen reichen [spaltbaren] Uranerze sind jedoch in so begrenzter Menge vorhanden, dass sie – sollte der gesamte gegenwärtige Elektrizitätsbedarf durch Kernenergie gedeckt werden – innerhalb von drei Jahren erschöpft wären. Die Nutzung der verbleibenden, weniger reichen Uranerze würde mehr CO₂-Emissionen verursachen, als fossile Brennstoffe direkt zu verbrennen.“* [Storm van Leeuwen and Smith 2003]

Schon vor mehr als 30 Jahren ausgesprochene Einsichten gewinnen neue Aktualität: *„Gelingt es, das Umweltproblem an seiner Wurzel, dem unkontrollierten Wachstum des Energieverbrauchs zu behandeln, so wird sich die Energieverknappung als Scheinproblem erweisen und der Aufbau der Kerntechnik künftig paradigmatisch für eine technische Fehlentwicklung stehen.“* [Weish und Gruber 1973]

Eine große Gefahr der Kernenergie liegt in der Verschärfung gesellschaftlicher Konflikte und der Verzögerung bzw. Verhinderung der Infrastrukturanpassung, wie sie für eine zukunftsfähige Energieversorgung notwendig ist. Die Auseinandersetzung um die Atomkraft bindet ein nicht zu unterschätzendes kreatives Potential der Gesellschaft, das in der Nachhaltigkeitsstrategie dringend vonnöten wäre.

Wasserstoffökonomie als Ausweg?

Ohne Zweifel ist Wasserstoff ein praktischer, weil speicherbarer, und auf den ersten Blick umweltfreundlicher Energieträger, der allerdings unter hohem Energieeinsatz (vorzugsweise mit Strom aus Solarzellen) erst z.B. aus Wasser gewonnen werden muss. Der großtechnische Übergang zu einer Wasserstoffökonomie erfordert aber einige Jahrzehnte und bringt unausweichlich wesentlich höhere Energiekosten als diejenigen, an die die heutige Wirtschaft angepasst ist. Über die

ökonomische Sinnhaftigkeit gibt es derzeit eine Kontroverse.¹ Kritiker weisen darauf hin, dass es energetisch wesentlich effizienter wäre, die zur Erzeugung von Wasserstoff erforderliche Elektrizität direkt zu verwenden und überdies den Aufwand für die zusätzliche technische Infrastruktur zu sparen.²

Eine groß angelegte Wasserstoff-Ökonomie mit entsprechenden Leckagen erscheint aber auch aus ökologischer Sicht nicht unproblematisch [z.B.: Schultz et al. 2003].

Die unausweichliche Krise

Das Kernproblem bleibt jedenfalls bestehen: Das Ende des Erdölzeitalters ist ja nicht erst dann erreicht, wenn das letzte Fass Rohöl verkauft ist, sondern wenn *billiges reichliches* Erdöl nicht mehr zur Verfügung steht. Keine der angedachten Alternativen kann jemals so billig sein, wie „sprudelnde“ Ölquellen. Aus diesem Grunde ist es absehbar, dass weite Bereiche der Wirtschaft wie das gigantische Verkehrssystem oder die industrielle Landwirtschaft nicht aufrecht zu erhalten sind und wenn dies – was zu befürchten ist – versucht wird, sind einschneidende volkswirtschaftliche Schäden unvermeidlich. Der Verlust der billigen Energiebasis bedeutet Versorgungskrisen und wirtschaftliche Zusammenbrüche, wenn nicht rechtzeitig konsequent gegengesteuert wird. Arbeitsplätze gehen verloren, die hohen Energiekosten lassen empfindliche Abstriche von Energiedienstleistungen befürchten. Dabei sind überraschende und weitreichende „Dominoeffekte“ mit katastrophalen Konsequenzen zu erwarten.

Industrielle Landwirtschaft wird teuer, Nahrungsmittel werden teuer (in der industriellen Lebensmittelproduktion erfordert die Erzeugung und Bereitstellung von einem Joule Nahrung nicht selten 10-20 Joule Erdöl). Die Nahrungsversorgung kann großräumig zusammenbrechen.

Die Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft können katastrophale Ausmaße erreichen.

Krise und Chance zugleich

Umdenken setzt ein

Die Einsicht, dass der verschwenderische Umgang mit Energie und Rohstoffen, wie er im „Erdölzeitalter“ möglich war, nicht zukunftsfähig ist und schleunigst Maßnahmen zur Bedarfssenkung eingeleitet werden müssen, leitet eine heilsame Wende ein:³

Verbraucherseitige Energiepolitik, wie sie seit den frühen Siebzigerjahren zwar in vielen Beispielen erfolgreich war, aber nicht konsequent betrieben wurde, bekommt endlich Vorrang.

Es werden Investitionen zur Strukturanpassung in Richtung Bedarfssenkung, Dezentralisierung, Ausbau erneuerbarer Energiesysteme und Solararchitektur getätigt. „Vergangenheitsorientierte“ Investitionen (wie etwa in neue Autobahnen, Schifffahrtsstraßen) werden vermieden. Kurzum,

¹ Siehe Literaturhinweise zur Wasserstoffökonomie

² Vergleiche Kapitel 11 in diesem Band.

³ Diese Wende wird im folgenden skizziert, um als positive Utopie in Zivilgesellschaft und Politik Motivation und Kraft zu mutiger Veränderung zu geben, damit die absehbaren schlimmen Folgen nicht in vollem Umfang Wirklichkeit werden.

eine „Energiewende“, wie sie schon Anfang der Siebzigerjahre umfassend angedacht war, wird konsequent umgesetzt.

Eine dramatische Bedarfssenkung (Abbau quantitativer und qualitativer⁴ Energie- und Rohstoffverschwendung) wird als Voraussetzung der ökologisch tragfähigen Versorgung aus erneuerbaren Energiequellen vollzogen.

Bei der Nutzung erneuerbarer Energie wird der Entwicklung „sanfter“ Techniken besonderes Augenmerk geschenkt. Ein gutes Beispiel ist die dezentrale Biogasgewinnung im Grünland.

So weist etwa das Konzept „Kraftwerk Wiese“ eine Reihe bestechender Vorteile auf: Mit KWK Anlagen kann wertvoller Spitzenstrom erzeugt werden, die Energiegewinnung ist CO₂-neutral, Biogasschlamm als wertvoller Dünger wird wieder im Grünland aufgebracht. Da er wegen seiner Pflanzenverträglichkeit auch während der Wachstumsperiode ausgebracht werden kann, gibt es keine Grundwassergefährdung durch Auswaschung; die Bodenfruchtbarkeit wird gefördert. Lebensmittel- und Biomasseproduktion lassen sich kombinieren, und selbst wenn diese Option nicht gewählt wird, kann die so erhaltene agrarische Struktur bei Bedarf jederzeit wieder auf Lebensmittelproduktion umgestellt werden.

Die Energiewende führt konsequenterweise zu einer Entspannung der Klimaproblematik.

„Peak Oil“ und die zu erwartenden ökonomischen Konsequenzen sind ein entscheidendes Argument für die Wirtschaft, im existentiellen Eigeninteresse unverzüglich Maßnahmen zur drastischen Einsparung fossiler Energieträger einzuleiten⁵. Es liegt ja auf der Hand, dass jede Verzögerung des notwendigen Strukturwandels mit vermeidbar gewesenen Energiekosten bestraft wird und daher im schärfer werdenden Konkurrenzkampf existenzbedrohend ist. Wirtschaftlicher Eigennutz wird zum Motor für die Klimapolitik.

Die Umweltsituation könnte teilweise ebenfalls besser werden, da Verschleißproduktion und die damit verbundenen Abfälle wegen steigender Energie- und Materialpreise zunehmend unrentabel werden. Langlebige Güter und deren Reparatur haben wieder bessere Chancen, mit Vorteilen für die Konsumenten und den Arbeitsmarkt.

„Ökosteuern“ und legislative Rahmenbedingungen schaffen sinnvolle Arbeitsplätze

Die in den letzten Jahrzehnten entwickelten und praktizierten lebensfreundlichen Alternativen ergänzen einander wechselseitig.

Anstelle großflächiger energieaufwändiger Monokulturen der industriellen Landwirtschaft treten kleinräumige Formen von Bioland- und Gartenbau und neue Kultursysteme der Permakultur. Auf diese Weise wird eine zukunftssichere Lebensmittelversorgung aufgebaut.

Ganz allgemein wird ein Prozess der Dezentralisierung eingeleitet. Die Orientierung an der Nutzung der Sonnenenergie begünstigt kleinräumige, verbrauchernahe Produktion.

⁴ Ein Beispiel qualitativer Energieverschwendung ist Heizen mit der „Edelenergie“ Elektrizität.

⁵ Die politische Entscheidung in Schweden, in den nächsten 20 Jahren die Abhängigkeit von Erdöl und Atomkraft zu beenden, liegt im längerfristigen Interesse der schwedischen Wirtschaft.

Die im Erdölzeitalter entstandenen „Megacities“ mit ihren Infrastrukturproblemen beginnen wieder „gesund zu schrumpfen.“ Es werden Ökodörfer gegründet, in denen Menschen nicht nur sinnvolle „Arbeitsplätze“ finden, sondern sich „Lebensplätze“ schaffen und einen erfüllenden zukunftsfähigen Lebensstil, gegründet auf Autonomie und Eigenleistung, entwickeln.

Die umweltzerstörende, energie- und rohstoffverschwendende Verschleißwirtschaft wird von einer „Reparaturgesellschaft“ abgelöst.

Die absehbare dramatische Verteuerung des Erdöls bietet die Chance für einen relativ friktionsarmen Übergang zu einer zukunftsverträglichen Wirtschaft und Gesellschaft. Die politische Herausforderung besteht darin, die erforderlichen legislativen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für diese Entwicklung zu schaffen.

Literatur

Campbell, C.J. (2000): BP Amoco Statistical Review of World Energy, Petroconsultants, LBST

Schindler, J. und Zittel, W. (2000): Der Paradigmenwechsel vom Öl zur Sonne. Natur und Kultur 1/1 2000, 48-69

Schultz et al. (2003): Air Pollution and Climate-Forcing Impacts of a Global Hydrogen Economy. Science 24. Okt. 2003, 624-627

Storm van Leeuwen J-W. and Smith, PH. (2003)
[<http://www.elstatconsultant.nl>] (Revision dated 31 October 2003)

Weish, P. und Gruber, E. (1973): Atomenergie und Umweltsituation. - Kramer Verl. Frankfurt/M.

Internetseiten zum Öl-Problem

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

<http://www.energiekrise.de/>

<http://www.peakoil.net/>

<http://www.wolfatthedoor.org.uk/>

<http://www.wbgu.de/>

<http://www.elstatconsultant.nl/>

Literaturhinweise: Pro und Kontra Wasserstoffökonomie

Pro:

http://www.hyweb.de/gazette/Thesen_und_Gegenposition_Wasserstoff.pdf

http://www.bio-wasserstoff.de/pdf/Stralsund2005_paper.pdf

Kontra:

<http://zeus.zeit.de/text/2004/42/Wasserstoff>

Ulf Bossel: Elektronenwirtschaft statt Wasserstoffwirtschaft

http://www.eurosolar.org/new/de/downloads/SZA_bossel.pdf

1 Wiederbelebung der Kernenergie- diskussion: Klimawandel und „Peak Oil“

Helga Kromp-Kolb und Franz Meister

September 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Wiederbelebung der Kernenergie-diskussion: Klimawandel und „Peak Oil“	32
1.1	Motivation	32
1.2	Der Klimawandel	32
1.2.1	Einleitung	32
1.2.2	Der beobachtete Klimawandel	33
1.2.3	Zukunftsszenarien	34
1.2.4	Extreme Wetterereignisse	35
1.2.5	Folgen des Klimawandels	35
1.2.6	Klimaschutzabkommen und Reduktionsziele	35
1.2.7	Mögliche Auswirkungen auf den Einsatz kerntechnischer Anlagen	36
1.3	„Peak Oil“	37
1.3.1	Einleitung	37
1.3.2	Die Rolle von Erdöl	37
1.3.3	Produktionsverlauf von Ölfeldern	38
1.3.4	Verfügbarkeit von Erdöl	40
1.3.5	Wann wird „Peak Oil“ erreicht?	40
1.3.6	Erdgas	42
1.4	Schlussfolgerungen	43
1.5	Literaturhinweise	44
1.5.1	Klimawandel	44
1.5.2	„Peak Oil“	45

1 Wiederbelebung der Kernenergie- diskussion: Klimawandel und „Peak Oil“

1.1 *Motivation*

In den letzten Jahren ist die Debatte um den Einsatz der Kernenergie in Folge des sich immer deutlicher manifestierenden Klimawandels und des absehbaren Endes der Ära billigen Erdöls neu aufgelebt. In Zusammenhang mit dem durch die Auseinandersetzung um den Preis von Erdgas zwischen Russland und der Ukraine im Frühjahr 2006 befürchteten Versorgungsengpass ist der Ruf nach Versorgungssicherheit, möglichst weitgehender Energieautarkie und einer gemeinsamen Energiepolitik in Europa laut geworden. Auch in diesem Zusammenhang wurde die Kernenergie wiederholt ins Spiel gebracht.

Das vorliegende Argumentarium des Forum für Atomfragen widmet sich in rund einem Dutzend Themenblättern der Frage, ob die Kernenergie ein möglicher, nachhaltiger Beitrag zum Klimaschutz sein kann und ob sie Alternativen zu fossilen Lösungen beim früher oder später eintretenden Ende billigen Öls („Peak Oil“) bzw. politisch-wirtschaftlich motivierten Engpässen bieten kann.

Diesen Diskussionen vorangestellt ist das vorliegende Papier, das überblicksartig einerseits den gegenwärtigen Klimawandel und die erwartete weitere Entwicklung darstellt, andererseits die Hintergründe und Anzeichen für das absehbare Eintreten von „Peak Oil“ darlegt.

1.2 *Der Klimawandel*

1.2.1 *Einleitung*

Das globale Klima war, soweit der Zustand der Erde zurück verfolgt werden kann, stets in Wandel begriffen, bedingt durch eine Reihe verschiedener, sich ändernder Einflussfaktoren, wie etwa der Intensität der Sonnenstrahlung, der Geometrie der Erdbewegungen oder der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre. In letzter Zeit trägt auch die menschliche Beeinflussung der Zusammensetzung der Atmosphäre und der Reflexionseigenschaften der Erdoberfläche zum Klimawandel bei. Die Zyklen und Veränderungen, denen die Einflussfaktoren unterliegen, weisen unterschiedliche Zeitmaßstäbe auf, die von Jahrmillionen bis zu Dekaden und Jahren reichen.

Änderungen der Erdbahn- und Erdachsenparameter und deren Interaktionen führen z.B. zum Wechsel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten – Klimazyklen mit Zeitdauern von etwa 100.000 Jahren, die aus Sedimenten, Eisbohrkernen, etc. rekonstruiert werden können. Es wird vermutet, dass Änderungen in der Intensität der Sonnenstrahlung und Vulkaneruptionen z.B. die sogenannten „Kleine Eiszeit“ verursacht haben, die nach dem mittelalterlichen Klimaoptimum in Europa etwa 300 Jahre angehalten hat, und aus den Gemälden gefrorener Grachten des Niederländers Breughels weithin bekannt ist.

Keiner der natürlichen Einflussfaktoren kann jedoch die rasche globale Erwärmung der letzten 150 Jahre, und insbesondere der letzten Jahrzehnte erklären. Dynamische Klimamodelle, auf mathematischen Gleichungen beruhend, welche die physikalischen Klimaprozesse beschreiben

(sogenannte Allgemeine Zirkulationsmodelle oder General Climate Models - GCMs), können diese Klimacharakteristika nur reproduzieren, wenn anthropogene Einflüsse berücksichtigt werden. Auf Grund dessen kam das Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC) in seinem im Jahr 2001 veröffentlichten Bericht [IPCC 2001] zu dem Schluss, dass es *„neue und stärkere Belege dafür gibt, dass der Großteil der beobachteten Erwärmung der letzten 50 Jahre menschlichen Aktivitäten zuschreibbar ist.“*

Anders als von den Medien transportiert, sind diese Erkenntnisse in der wissenschaftlichen Welt nicht mehr umstritten. Auch hinsichtlich der aus dem Klimaverständnis für die Zukunft ableitbaren Szenarien herrscht weitgehender Konsens, wiewohl die Unsicherheiten hier naturgemäß wesentlich größer sind.

1.2.2 Der beobachtete Klimawandel

In den letzten Jahren ist immer deutlicher geworden, dass eine Änderung des Klimas weltweit stattfindet. Der Klimawandel kann sowohl aus den meteorologischen Messreihen abgelesen werden, als auch aus Beobachtungen der Geo- und Biosphäre. Einige Beispiele sind im Folgenden angeführt.

Die Temperatur ist im letzten Jahrhundert im globalen Mittel um etwa 0,6 °C gestiegen ist, wobei dieser Anstieg der rascheste der letzten 1000 Jahre ist, und die erreichten Temperaturen die höchsten in diesem Zeitraum sind [IPCC 2001]. Der Temperaturanstieg kann bis in 8 km Höhe beobachtet werden. Der Anstieg ist bei Nacht größer als bei Tag, so dass die Tagesamplitude zurückgeht. Anhand des Verlaufes der Globaltemperatur ist zu erkennen, dass sich die Änderung beschleunigt: 0,07 °C pro Dekade zwischen 1901 und 2000, 0,15 °C pro Dekade zwischen 1981 und 2000 [Schönwiese et al. 2004].

Das globale Phänomen „Klimawandel“ kann regional und lokal starke Modifikationen erfahren: Während das globale Mittel der Temperatur in den letzten 150 Jahren um 0,6°C angestiegen ist, wurde im alpinen Raum ein Anstieg von 1,6 °C beobachtet [Auer et al. 2001] und in der Arktis sogar um mehr als 4°C [Hassel 2004].

Die beobachteten Veränderungen im Niederschlagsgeschehen sind räumlich differenzierter und statistisch signifikante Trends über größere Gebiete können in den verfügbaren Niederschlagsreihen häufig nicht gefunden werden. Die Niederschlagssummen haben global um 0,5 - 1 % / Dekade zugenommen – in den Tropen weniger, im Norden Europas hingegen deutlich mehr. Manche Regionen, z.B. der Süden Europas, sind trockener geworden. Intensive Niederschläge nehmen zu, und auch die Bewölkung [IPCC 2001].

Die sehr kleinräumig unterschiedliche Struktur des Niederschlagsverhaltens sei am Beispiel Deutschlands demonstriert: insgesamt ist der Niederschlag in Deutschland von 1971 - 2000 um 16 % angestiegen, im Winter sogar um 34 %. Besonders hoch ist der Anstieg im Westen und Süden Deutschlands, wo er auch mit häufigeren extrem hohen Monats- und Tageswerten verbunden ist. Geringer fällt er im Osten aus, wo im Sommer sogar ein leichter Rückgang zu verzeichnen ist und die Gefahr von Dürreperioden steigt. Trends von Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 180 mm Monatsniederschlag 1901 - 2000 zeigen fast durchwegs positive Tendenzen [Schönwiese et al 2004].

Mit wenigen Ausnahmen (z.B. in Skandinavien und Neuseeland) ziehen sich Gletscher zurück und Permafrostgebiete tauen auf, sowohl im Gebirge als auch in der Tundra. Besonders drastisch ist die Abnahme der Dicke des Eises in der Arktis und der Rückgang der vereisten Fläche [IPCC 2001, Hassol 2004].

In Europa haben sich phänologische Phasen um ca. zwei Wochen verschoben, das heißt Frühjahr und Sommer, gemessen am Austreiben der Pflanzen und Reifen der Früchte, setzen früher ein [DWD 2002]. Die Schlüpfzeiten, das Zugverhalten und die Zahl der Bruten verschiedener Vogelarten verändert sich [Bairlein und Winkel 1998]. Der Vergleich mit historischen Aufzeichnungen zeigt die Wanderung von Arten in höhere Regionen. In der Arktis sind die Eisbären aufgrund der Eisschmelze bedroht [Hassol 2004].

1.2.3 Zukunftsszenarien

Dieselben Klimamodelle, mit denen das vergangene Klima rekonstruiert werden kann, können genutzt werden, um Zukunftsszenarien zu berechnen, wenn Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Wirtschaft, der Technologie etc. getroffen werden, aus denen sich die Treibhausgasemissionen ableiten lassen.

Szenarien für 2100 lassen CO_2 -Konzentrationen zwischen 550 und 950 ppm erwarten. Je nachdem, wie erfolgreich die Reduktionsmaßnahmen für Treibhausgase sind, ist mit einer globalen Temperaturerhöhung von 1,4 bis 5,8°C in den nächsten 100 Jahren zu rechnen [IPCC 2001]. Die beobachtete Erwärmung wird nach bisherigen Erkenntnissen weit über das 21. Jahrhundert hinaus anhalten.

Um lokale und regionale Klimate zu erfassen, müssen die Ergebnisse der globalen Klimamodelle, die eine horizontale Auflösung von nur etwa 150 km haben, „regionalisiert“ werden. Obwohl die kleinräumigeren Ergebnisse noch mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sind, leisten sie wertvolle Beiträge für das Studium möglicher Auswirkung der Klimaänderungen.

Die globale Temperaturzunahme von 1,4 bis 5,8°C führt in Europe zu einem Temperaturanstieg um 0,1 bis 0,4°C pro Dekade, mit etwas geringeren Werten an der Atlantikküste und höheren im Süden und Nordosten. Noch raschere Erwärmung wird für das kontinentale Russland im Winter erwartet. Im Sommer entwickelt sich ein starker Nord-Süd Gradient aufgrund der fast doppelt so raschen Erwärmung im Süden wie im Norden. [Prudence 2006]

Derartige regionale Szenarienberechnungen lassen im noch kleineren Maßstab für Deutschland z.B. folgende Änderungen erwarten: Für Hessen und den Norden Deutschlands ergeben sich bis 2040/2050 bis zu 60 % Niederschlagszunahme. Besonders im Süden und Nordosten Deutschlands lassen Modellberechnungen eine deutliche Verringerung der Niederschläge bis zu 30 % erwarten. Die Sommer werden eher trockener, im Winter ist weiterhin mit Niederschlagszunahmen zu rechnen [Enke et al. 2004]. Lokale und regionale Extremniederschläge sind überall möglich [Schönwiese et al. 2004].

Infolge der Erwärmung der Meere und des Abschmelzens von polarem und alpinem Eis kommt es zu einem Ansteigen des Meeresspiegels, der bis zum Ende des Jahrhunderts nach IPCC 2001 zwischen 55 und 88 cm liegen wird. Neuere Arbeiten kommen zu dem Ergebnis, dass der Anstieg auch beträchtlich höher, bei etwa 4 m liegen könnte [Overpeck et al. 2006].

Verbunden mit den Änderungen der Temperatur und des Niederschlages sind Veränderungen zahlreicher anderer meteorologischer Größen, die hier nicht im Einzelnen diskutiert werden können.

1.2.4 Extreme Wetterereignisse

Es gibt Hinweise, dass mit dem Übergang zu einem wärmeren Klima auch Extremereignisse, wie Starkniederschläge, Stürme, aber auch Dürre und Hitzeperioden zunehmen. Wiewohl es keinen strengen wissenschaftlichen Nachweis gibt, dass einzelne, konkrete Ereignisse eine Folge des Klimawandels sind, muss doch aufgrund statistischer Betrachtungen ein Zusammenhang zwischen Klimawandel und der Zunahme von extremen Wetterereignissen als wahrscheinlich gelten. Mit der Verschiebung der mittleren Temperaturverhältnisse werden z.B. auch extrem hohe Temperaturen häufiger. Steigt gleichzeitig mit der Verschiebung des Temperaturmittels auch die Varianz der Temperaturverteilung, so wird der Effekt verstärkt und es kann die Häufigkeit hoher Temperaturen noch weiter ansteigen und die Maximaltemperaturen können neue Rekordwerte erreichen. Berechnungen für die Schweiz haben z.B. ergeben, dass der europäische Ausnahme-Sommer 2003, für den zur Zeit eine Wiederkehrwahrscheinlichkeit von über 1000 Jahren angegeben wird, in den Jahren 2070 – 2100 wegen der zunehmenden Varianz schon eher als normal zu betrachten sein könnte [Schär et al. 2004].

Auch physikalische Überlegungen, z.B. zur Anheizung des Wasserkreislaufes in einer wärmeren Atmosphäre, lassen Veränderungen hinsichtlich der extremen Wetterereignisse, z.B. intensiver Niederschläge, erwarten.

1.2.5 Folgen des Klimawandels

Klimaänderungen betreffen weltweit jeden Einzelnen und praktisch alle Wirtschaftssektoren direkt oder indirekt. Manche kleine Inselstaaten sind auf Grund des steigenden Meeresspiegels in ihrer physischen Existenz bedroht. In anderen, zum Teil sehr bevölkerungsreichen Ländern, wie Ägypten oder Bangladesch, verlieren Millionen von Menschen ihre Heimat und Lebensgrundlage mit der Überflutung des Landes durch das Meer. Die Analysen des IPCC haben ergeben, dass Entwicklungsländer wegen der geringeren Anpassungsmöglichkeiten besonders verletzlich gegenüber dem Klimawandel sind: Verschärfte Wasserknappheit und signifikante Ertragseinbußen z.B. bei Getreide lassen Hungersnöte und Völkerwanderungen erwarten. Insgesamt muss man von einer Destabilisierung der Welt und von zunehmendem Konfliktpotential ausgehen [IPCC 2001, Schwartz et al. 2003, WBGU 2003].

1.2.6 Klimaschutzabkommen und Reduktionsziele

Die erste globale politische Reaktion auf den Klimawandel, die 1992 in Rio de Janeiro von 154 Staaten unterzeichnete Klimaschutzkonvention, sieht in ihrer Zielformulierung vor: *„...eine Stabilisierung der Treibhausgase in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, das gefährliche anthropogene Einmischung in das Klimasystem verhindert. Dieses Niveau soll in einem Zeitraum erreicht werden, der den Ökosystemen erlaubt sich auf natürliche Weise an die Klimaänderung zu adaptieren, der sicherstellt, dass die Nahrungsmittelproduktion nicht gefährdet wird und der ökonomische Entwicklung in einer nachhaltigen Art ermöglicht.“* Aus der Konvention lassen sich nicht unmittelbar konkrete Maßnahmen ableiten, die von den einzelnen Unterzeichnerstaaten umzusetzen wären. Es wird jedoch eine Linie vorgegeben, entlang welcher die weitere Entwicklung erfolgen soll. Die Festlegung der notwendigen Schritte zur Erreichung dieses Zieles und

der Sanktionen bei Nicht-Umsetzung erfolgt schrittweise in alljährlich stattfindenden Treffen der Unterzeichnerstaaten (Conference of the Parties, COP).

Bei der COP 1997 in Kyoto, Japan, wurden für jeden Unterzeichnerstaat Reduktionsziele für CO₂ und andere Treibhausgase vereinbart, die insgesamt gegenüber den Emissionen der Industriestaaten von 1990 eine Reduktion um 5 % ergeben. Diese Maßnahme bleibt weit hinter dem zurück, was aus wissenschaftlicher Sicht nötig ist, um auch nur eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre zu erreichen. Dennoch kommt diesem sogenannten „Kyoto-Protokoll“ große Bedeutung zu, weil es – mit seinem Inkrafttreten 2005 – die ersten völkerrechtlich verbindlichen Emissionsreduktionen festlegt.

Inzwischen wird schon über den Kyoto-Zeitraum (2008 - 2012) hinaus gedacht: Von europäischer Seite werden Emissionsreduktionen vorgeschlagen, die den globalen Temperaturanstieg gegenüber der vorindustriellen Zeit mit 2 °C begrenzen sollen. Bei Überschreiten dieses Temperaturgrenzwertes wird mit nicht verantwortbaren Folgen gerechnet und mit einem unzulässigen Anstieg der Wahrscheinlichkeit für nicht beherrschbare große Umwälzungen, wie etwa dem Absterben der Thermohalinen Zirkulation¹. Um das 2°-Ziel zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 weltweit um ca. 50 % gegenüber 1990 gesenkt werden, in den Industriestaaten um etwa 80 %. Dies könnte auf verschiedenen Wegen erreicht werden, von denen manche den Ausbau des Beitrages der Kernenergie und/oder Sequestrierung von CO₂ vorsehen, während andere ohne beide auskommen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Frage, wann „Peak Oil“ eintritt und wie weit bis dahin die Energieeffizienzsteigerung und der großflächige Einsatz von alternativen Energien entwickelt sind. [WBGU 2003]

1.2.7 Mögliche Auswirkungen auf den Einsatz kerntechnischer Anlagen

Der Klimawandel erfordert Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen ebenso wie zur Anpassung an die geänderten Klimabedingungen. Beide Kategorien von Maßnahmen können Auswirkungen auf den Einsatz kerntechnischer Anlagen haben.

Der mögliche Beitrag der Kernenergie zur Minderung der Treibhausgasemissionen wird in anderen Beiträgen des Argumentariums aus verschiedenen Blickwinkeln ausführlich diskutiert. Die Quintessenz der Aussagen ist, dass auf der Basis bestehender und absehbarer Technologien kein wesentlicher Beitrag in den im Rahmen der UNFCCC angesprochenen Zeiträumen zu erwarten ist. Dies schließt die von vielen als Hoffungsgebiet angesehene nukleare Produktion von Wasserstoff zur Reduktion der Treibhausgasemissionen aus dem Verkehrssektor mit ein.

Als Beispiel für Anpassungsmaßnahmen sei die Verschiebung der Nachfrage nach Energie vom Winter (Heizung) auf den Sommer (Kühlung) in mittleren und höheren Breiten angeführt. Während Elektroheizungen nur einen kleinen Teil der winterlichen Heizleistung abdecken, erfolgt die Kühlung in den Industriestaaten derzeit noch zu einem wesentlichen Teil elektrisch. Während der Bedarfsrückgang im Winter sich daher nur wenig auf den Strombedarf auswirken wird, ist ein klimabedingter Anstieg der Nachfrage im Sommer zu erwarten. Dies könnte einen Anreiz für den weiteren Ausbau der Kernenergie darstellen. Technologische Entwicklungen, die vom Strom zur Kühlung wegführen, zeichnen sich jedoch bereits ab.

¹ Häufig auch als Erliegen des Golfstromes bezeichnet.

Schließlich hat der Klimawandel auch Auswirkungen auf die Sicherheit von nuklearen Anlagen. Dieses Thema wird im Rahmen der Diskussion um die Sicherheit von Kernkraftwerken behandelt.

1.3 „Peak Oil“

1.3.1 Einleitung

„Die konventionelle Weisheit der vorherrschenden ökonomischen Theorien gründet auf dem Axiom, dass weltweites Wirtschaftswachstum, das eine ständige Zunahme der Erzeugung und des Verbrauches von Energie verzehrenden Waren impliziert, über unbegrenzte Zeit anhalten kann. Dass Kräfte des Marktes sicherstellen werden, dass neue Ressourcen und neue Technologien stets verfügbar sein werden, wenn der Zugang zu Ressourcen von denen die Gesellschaft abhängt, schwierig wird und gegenwärtige Technologien daher obsolet werden.

Die Geschichte zeigt, dass die Menschheit sich bisher das Leben erfolgreich durch neue Energiequellen und Technologien erleichtert hat. Von der Kraft des Menschen zur Kraft des Pferdes. Von der Pferdestärke zur kohlengefeuerten Dampfmaschine. Von Dampfmaschinen zu Ölmaschinen. Die wirtschaftliche Entwicklung war dieserart sozusagen ein Abstieg mit dem Wind im Rücken. Aber es ist nichts in Sicht, das so leicht und einfach zu gewinnen, handhaben, speichern und verwenden ist in Kraftfahrzeugen, Bussen, Lastkraftwagen, Traktoren, Schiffen und Flugzeugen, wie Öl aus Ölquellen. Deshalb stehen wir vor einem anstrengenden Aufstieg mit Gegenwind, wenn eines Tages die Vorräte an billigem, konventionellem Öl knapp werden – sofern nicht etwas derzeit nicht Bekanntes auftaucht oder unsere auf Öl beruhende Konsumentenkultur eine Wende hin zu weniger ölabhängigen Aktivitäten macht.

Die Geschichte könnte zeigen, dass das vorherrschende Axiom des nachhaltigen Wachstums eine theoretische Ableitung der Billig-Öl-Era ist. Öl-Geologen haben – im Gegensatz zur ökonomischen Theorie – Sorge hinsichtlich des künftigen Öl-Angebots geäußert.“ [Illum. 2004]

1.3.2 Die Rolle von Erdöl

Erdöl ist mit einem Anteil von rund 40 % am Weltenergieverbrauch nach wie vor der wichtigste Energieträger der Weltwirtschaft. Von allen Wirtschaftssektoren spielt es im Bereich der Mobilität die größte Rolle: 50-60 % des Öls werden im Verkehr verbraucht und 90 % der Energie im Bereich des Verkehrs stammt aus Erdöl und Erdgas.

Erdöl ist auch einer der wichtigsten Rohstoffe der Welt, viele essentielle Dinge des täglichen Lebens werden daraus hergestellt:

- Chemikalien und Lösungsmittel
- Plastik
- Farben und Lacke
- Verpackungen, Folien und Plastikhüllen

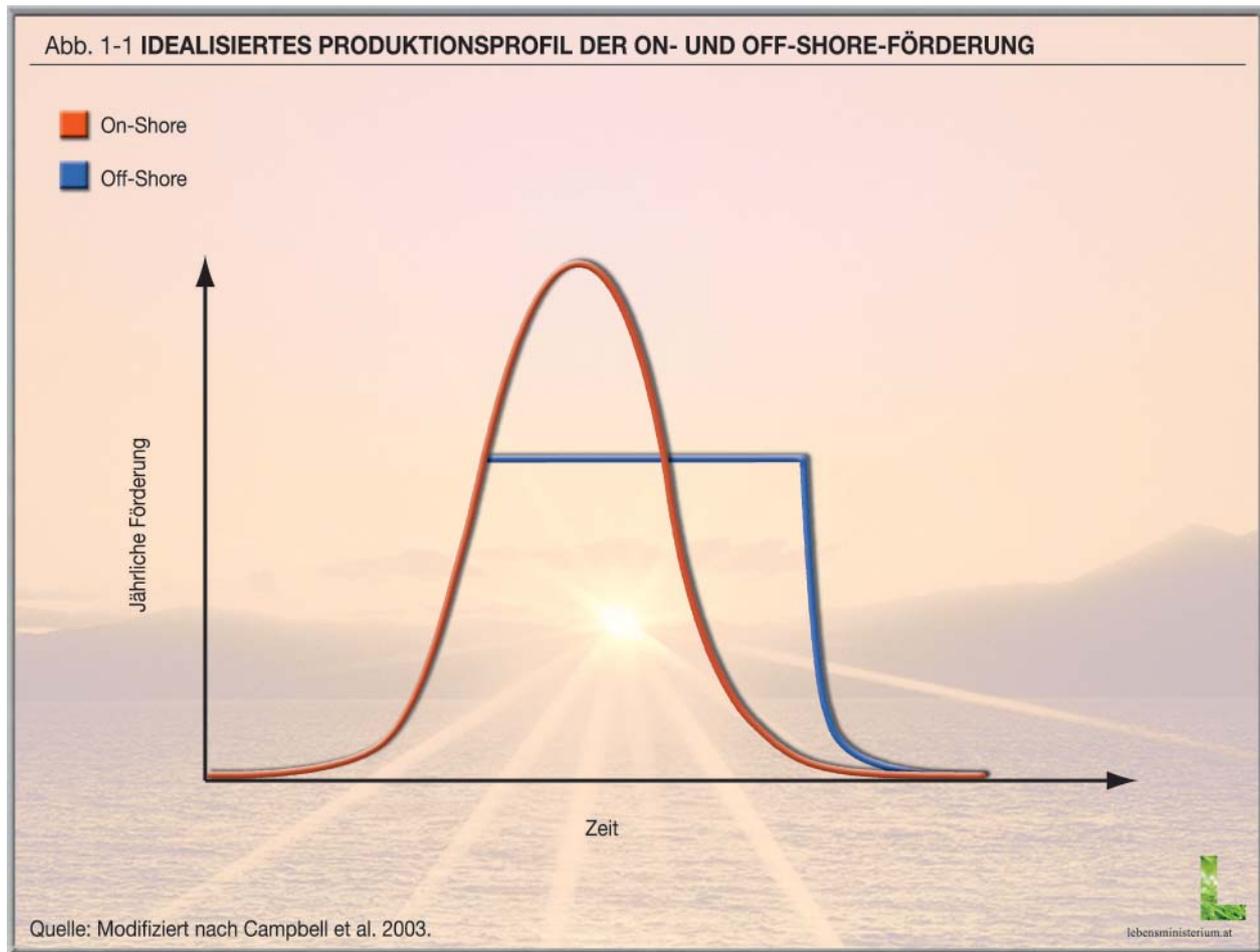
- Kunstfasern (Teppichböden, Kleidung, Gardinen)
- Körperpflege und Kosmetik (Seifen, Parfüms, Lippenstifte und Haarsprays)
- Ausbau der Infrastruktur (Straßenbau)
- Medikamente
- Düngemittel und Pestizide

Diese knappe Liste illustriert, dass Erdöl, seine Verfügbarkeit und sein Preis für die Volkswirtschaften der Welt von eminent wichtiger Bedeutung sind.

1.3.3 Produktionsverlauf von Ölfeldern

Die Produktion eines Ölfeldes verläuft gemäß einer Glockenkurve, die mit steigender Erschließung des Feldes ansteigt und nach Förderung etwa der Hälfte des Vorkommens wieder abfällt (Abbildung 1-1). Wenn der Druck im Reservoir abfällt, muss das verbleibende Öl mit zunehmend mehr Aufwand gefördert werden. In geringem Maße kann man den Druck künstlich wieder erhöhen (z.B. durch Injektion von Gas oder Wasser) oder die Viskosität des Öls durch Additive reduzieren. Diese Maßnahmen können jedoch den Abfall (und damit die Produktionsrate) nur innerhalb bestimmter Grenzen beeinflussen. Befindet sich die Förderung eines Ölfeldes vor dem Produktionsmaximum, so kann die Produktionsrate durch Zubau neuer Förderanlagen gesteigert werden. Befindet sie sich jedoch bereits jenseits des Produktionsmaximums, so kann der Rückgang der Produktion mit technischem und finanziellem Aufwand aus ökonomischen Erwägungen verlangsamt werden, tendenziell geht die Produktionsrate jedoch unweigerlich Jahr für Jahr zurück. [Cambell et al. 2003]

Etwas anders ist die Situation bei Off-Shore-Förderung: Während an Land auch eine langsam zurückgehende Förderung mit mehreren Prozent pro Jahr Rückgang über viele Jahre hinweg sinnvoll ist, da die getätigten Investitionen die laufenden Betriebsausgaben bei weitem übersteigen, versucht man, Off-Shore-Ölfelder so schnell wie möglich auf möglichst hohem Niveau auszubeuten. Fällt die Produktion unter eine bestimmte Rate zurück, so lohnen die hohen Betriebskosten der Off-Shore-Plattformen nicht mehr. Da die europäische Ölförderung weitgehend off-shore stattfindet, erwarten Experten einen sehr schnellen Abfall der Produktion am Ende des Produktionsplateaus der großen älteren Felder [Cambell et al. 2003].



Zahlreiche Beispiele belegen den typischen Verlauf der Ölförderung: 1991 fand man in Cruz Beana in Kolumbien das größte Vorkommen in der westlichen Hemisphäre seit 1970. Die Fördermenge fiel von 500.000 Barrel pro Tag zum Zeitpunkt der Maximalproduktion auf 200.000 Barrel pro Tag im Jahr 2002. Mitte der 80er Jahre wurden im Forty Field in der Nordsee 500.000 Barrel pro Tag gefördert - heute sind es nur noch 50.000. Eines der größten Ölvorkommen der letzten 40 Jahre, Prudhoe Bay, brachte fast 12 Jahre lang, bis 1989, 1,5 Millionen Barrel pro Tag. Heute sind es nur noch 350.000 Barrel täglich. Das riesige russische Samotlor-Feld brachte zu Spitzenzeiten eine Höchstfördermenge von 3,5 Millionen Barrel pro Tag, heute liegt sie bei 350.000. In jedem dieser Ölfelder wurde die Förderung dadurch verstärkt, dass man Gas oder Wasser von oben in die ölhaltige Schicht pumpte, damit der Förderdruck im Ölfeld aufrechterhalten werden kann. Das größte Ölfeld der Welt, Ghawar in Saudi-Arabien, liefert derzeit fast 60 % des saudi-arabischen Öls, ungefähr 4,5 Millionen Barrel² täglich. Vor Jahren sprudelte das Öl von allein aus dem Boden. Um diese Menge heute zu erzielen, müssen nach Angaben von Geologen 7 Millionen Barrel Salzwasser pro Tag hineingepumpt werden, ein Signal für den bevorstehenden Rückgang der Förderung des größten Ölfeldes der Welt.

Da die meisten Gebiete außerhalb des Nahen Ostens nahe am Produktionsmaximum sind oder dieses bereits überschritten haben, ist eine Produktionssteigerung in diesen Gebieten nicht zu erwarten, tendenziell wird hier die Förderung Jahr für Jahr zurückgehen: Die USA, der ehemals wichtigste Ölproduzent, hat ihr Produktionsmaximum schon vor 30 Jahren überschritten und fördert heute nur noch 60 % der damaligen Ölmengen. Aus ökonomischen Gründen versucht man,

² Ein Barrel entspricht 159 Liter.

den Abfall der Produktion jenseits des Maximums zu verzögern. Die europäische Ölförderung wird spätestens innerhalb weniger Jahre das Produktionsmaximum überschreiten.

1.3.4 Verfügbarkeit von Erdöl

Die Debatte um die Verfügbarkeit von Erdöl nährt sich also nicht nur aus den in den letzten Jahren aufgetretenen deutlichen Erhöhungen der internationalen Erdölpreise. Beim Verfolg dieser Diskussion ist Vorsicht geboten, da „Verfügbarkeit“ in unterschiedlicher Bedeutung verwendet wird:

- Verfügbarkeit in Bezug auf die grundsätzlich noch förderbaren Mengen, d.h. Reserven,
- Verfügbarkeit in Bezug auf die Befriedigung der steigenden Nachfrage gemessen an den täglichen Fördermöglichkeiten,
- Verfügbarkeit in Bezug auf die Sicherung der Quellen bzw. der Transportwege und
- Verfügbarkeit unter Berücksichtigung der Preisentwicklung.

Als „Peak Oil“ wird der Zeitpunkt bezeichnet, zu dem die maximale Förderleistung global erreicht wird. Nach „Peak Oil“ geht die Förderleistung zurück, selbst bei Inkaufnahme höherer Förderkosten. „Peak Oil“ markiert also nicht die Erschöpfung der Ölreserven; es markiert den Zeitpunkt, ab welchem die Verfügbarkeit aufgrund der rückläufigen täglichen Fördermenge bei gleichbleibender oder wachsender Nachfrage stetig schlechter wird und folglich der Preis ansteigt.

„Der wesentliche Aspekt ist der, dass ab dem Moment, ab dem ein Feld sein Fördermaximum überschritten hat, die genaue Höhe der Reserven für die Höhe der künftigen Produktionsraten keine Rolle mehr spielt. Wie auch immer sich am Ende der Produktion die insgesamt förderbare Menge darstellen mag (im Vergleich zu den anfänglichen Schätzungen), die Förderraten werden nur noch zurückgehen. [...] Entscheidend für strukturelle Änderungen der Energieversorgung ist nicht die (statische oder dynamische) Reichweite der Reserven, also wie lange reicht das gefundene Öl bei vorgegebener jährlicher Förderquote?, sondern die Frage: Ab welchem Zeitpunkt kann die Ölproduktion aus geologischen, technischen und ökonomischen Gründen nicht mehr erhöht werden, sondern nimmt tendenziell nur noch ab?“ [Campell et al. 2003]. Diese Tatsache erleichtert die nachfolgende Diskussion um „Peak Oil“ insofern, als die Zahlen, die zur Größe der Ölreserven angegeben werden, stark divergieren und auch mitunter dramatischen Korrekturen unterworfen werden, das heißt, dass sie großen Unsicherheiten unterliegen. Demgegenüber sind jene der jährlichen Förderung viel besser bekannt. Nachträglich ist der Zeitpunkt des Produktionsmaximums jedenfalls gut zu bestimmen; er liegt beim Großteil aller Ölquellen bereits in der Vergangenheit.

1.3.5 Wann wird „Peak Oil“ erreicht?

Die weltweite Erdölproduktion hat derzeit einen Höchstwert erreicht. *„Wir haben heute die Hälfte dessen, was vorhanden ist, gefördert, und kennen 90 % aller Erdölvorkommen. Wir produzieren heute 22 Gb pro Jahr, aber finden nur 6 Gb pro Jahr. Deshalb können wir sagen, heute finden wir pro vier Barrel, die wir konsumieren, nur noch ein Barrel neu. Die gegenwärtige Rate der Erschöpfung der Erdölfelder liegt bei 2 % pro Jahr“ [Campbell 2000].*

In dem Jahrzehnt von 1990 bis 2000 wurden 42 Milliarden Barrel an neuen Öreserven entdeckt. In der gleichen Zeit war ein weltweiter Verbrauch von 250 Milliarden Barrel zu verzeichnen. In den letzten zwei Jahrzehnten sind nur drei riesige Felder mit jeweils einer Milliarde Barrel entdeckt worden, in Norwegen, in Kolumbien und in Brasilien. Auf jedem Feld werden nur 200.000 Barrel täglich gefördert. Der Gipfelpunkt der Ölfunde trat schon Mitte der 60er Jahre auf, große Lager wurden seit den frühen 90er Jahren nicht mehr gefunden. [Petroconsultants 1995]

Die Hoffnung auf neu zu findende große Lager konventionellen Öls ist bei den Fachleuten gering, da zur Entstehung von Erdöl bestimmte naturräumliche Voraussetzungen erforderlich sind.

Die Menge des bereits gefundenen Öls und seine regionale Verteilung werden daher verstärkt den Produktionsverlauf in den nächsten Jahren bestimmen. 90 % der gegenwärtigen Ölproduktion kommen aus Feldern, die älter als 20 Jahre sind und 70 % aus Feldern, die älter als 30 Jahre sind. Dem kürzlich veröffentlichten Bericht über „Die weltgrößten Ölfelder“ zufolge, erstellt von der Colorado School of Mines, *„liefern die 120 größten Ölfelder der Welt an die 33 Millionen Barrel täglich, dies sind fast 50 % des weltweiten enormen Ölbedarfs. Die 14 größten liefern über 20 %, ihr Durchschnittsalter liegt bei 43,5 Jahren“* [Simmons, 2002].

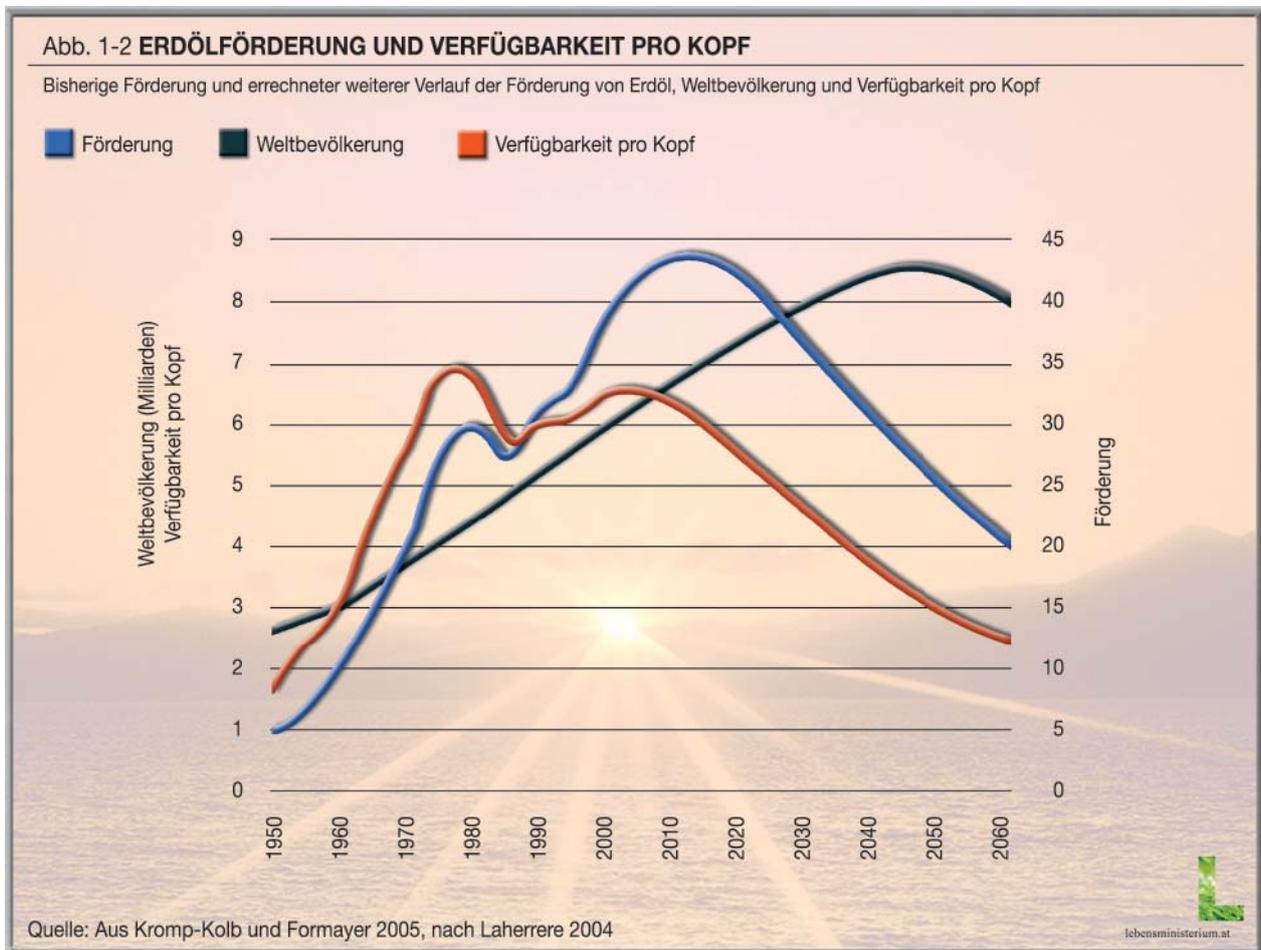
Kompetenten Schätzungen international angesehener Geologen zufolge, beispielsweise des French Petroleum Institute, der Colorado School of Mines, der Uppsala University und von Petroconsultants in Genf, werden die Auswirkungen der rückläufigen Öreserven bzw. Ölförderung bis zum Ende dieses Jahrzehnts oder sogar früher drastisch zu spüren sein.

Gegenteilige Meinungen werden interessanter Weise vor allem von Ökonomen vertreten, wie z.B. dem BP-Chefökonom Peter Davies, die glauben, dass der Markt die Verfügbarkeit von Öl regeln werde: Bei Verknappung steigen die Ölpreise und machen die Ausbeutung weniger leicht zugänglicher Lager (z.B. unkonventionelle Reserven) lohnend, so dass wieder mehr Öl verfügbar würde. Das mag zwar im Prinzip stimmen, es wird aber dabei übersehen, dass der entscheidende Faktor die Förderrate, d.h. die Produktion pro Tag oder Jahr, nicht die Fördermenge ist, und die erzielbaren Förderraten der meisten unkonventionellen Reserven wesentlich niedriger liegen, als die der Ölquellen.

Pessimistische Stimmen [vgl. z.B. Savinar 2006] halten „Peak Oil“ für den Wendepunkt in der Geschichte der industrialisierten Welt, da diese in allen Bereichen von ausreichend billigem Öl abhängig ist. Dies gilt u.a. auch für die industrialisierte Landwirtschaft, welche nur unter Verwendung von fossiler Energie (Kohle, Öl) und Produkten aus Öl (Düngemittel, Pestizide) zu der heutigen Leistungsfähigkeit gelangen konnte. „Peak Oil“ sei deshalb von zentraler Bedeutung, weil damit zu rechnen ist, dass mit dessen Erreichen der Preis überproportional ansteigen wird und eine weitreichende Ölkrise auslöst. Nicht mehr primär die Nachfrage wird dann den Preis auf dem Markt regulieren, sondern das immer knappere Angebot (sog. „sellers market“).

Von jenen Experten, die hinsichtlich „Peak Oil“ besorgt sind, meinen einige, dass „Peak Oil“ außerhalb des Gebietes der OPEC schon im Jahre 2000 überschritten wurde, andere gehen etwa vom Jahre 2010 aus [z.B. Campbell et al. 2003, Simmons 2002]. In jedem Fall hätte die Überschreitung von „Peak Oil“ zur Konsequenz, dass die Bedeutung der OPEC wieder stärker zunehmen wird. Die OPEC-Länder können die Förderquote und damit auch den Preis bestimmen und so einen wachsenden politischen Druck auf die Industrienationen ausüben. Insbesondere

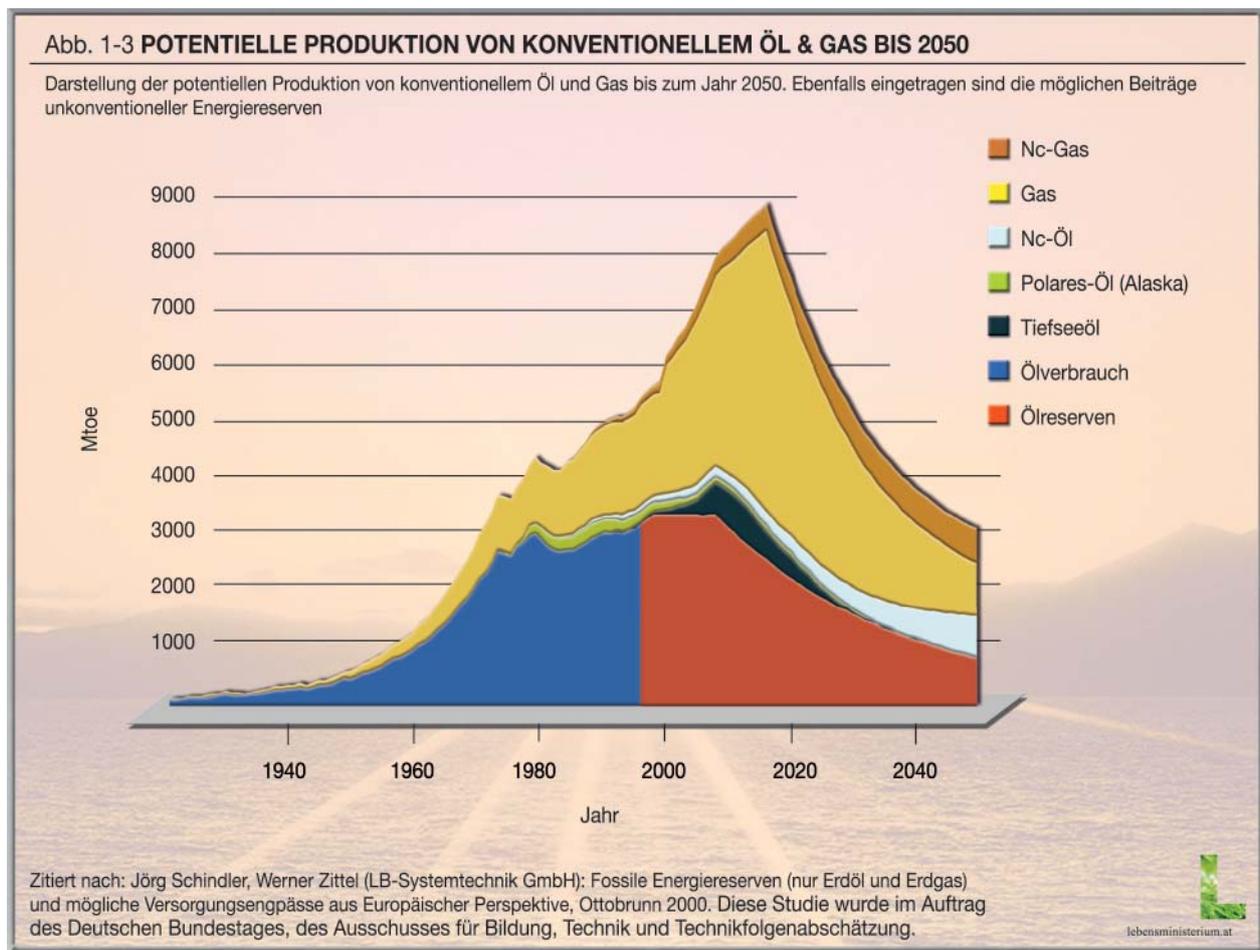
Saudi Arabien, Irak und Iran, die jeweils große Reserven auszuweisen haben, gewinnen weiter an geopolitischer Bedeutung.



1.3.6 Erdgas

Erdgas ist leichter zu fördern als Erdöl und die Förderrate richtet sich stärker nach dem Markt als die von Erdöl. Die Förderrate ist oft über viele Jahre konstant. Sehr häufig erfolgt jedoch der Abfall am Ende wesentlich rascher als bei Erdöl.

Auch die Verfügbarkeit von Erdgas hat sich in manchen Weltregionen bereits deutlich verringert. Die amerikanische Gasproduktion hat ihr Maximum mehr oder weniger erreicht und es könnte schon bald zu einer Gasversorgungskrise kommen. In Europa wird die Situation in wenigen Jahren ähnlich sein. Wird in dem Ausmaß, in dem weltweit die zur Verteilung des Erdgases erforderliche Infrastruktur ausgebaut wird, Gas verbraucht, so könnte das Maximum der weltweiten Gasförderung um das Jahr 2020 oder schon früher erreicht werden. [Campbell et al 2003]



1.4 Schlussfolgerungen

Sowohl die Maßnahmen, die zum Schutz des Klimas erforderlich sind, als auch die absehbare Verknappung von Erdöl und Erdgas legen die Suche nach neuen Wegen, den Energiebedarf abzudecken, nahe.

Auf der einen Seite wird die Erhöhung der Energieeffizienz und der Ausbau erneuerbarer Energien gefordert, auf der anderen wird die verstärkte Nutzung nuklearer Technologien in Diskussion gebracht. Dabei ist nicht nur an den Einsatz von Kernkraftwerken zur Stromerzeugung gedacht, sondern auch zur Erzeugung von Wasserstoff. Wie Elektrizität ist Wasserstoff ein Energieträger, keine Energiequelle, und er muss daher unter Aufwendung von Energie erzeugt werden.

Im Sinne einer langfristigen, zukunftsorientierten Lösung muss die Antwort auf den Klimawandel und auf die Verknappung von Erdöl und Erdgas nachhaltig sein – ökologisch, ökonomisch und sozial. Der Frage, ob nukleare Technologien dieses Kriterium erfüllen können, d.h. einen nennenswerten und nachhaltigen Beitrag liefern können, gehen die 11 Fachbeiträge dieses Bandes nach.

1.5 Literaturhinweise

1.5.1 Klimawandel

Auer, I., R. Böhm, W. Schöner (2001): Austrian Long-Term Climate - Multiple Instrumental Climate Series from Central Europe. Österr. Beitr. zu Meteorologie und Geophysik, Heft 25

Bader, S. und P. Kunz(1998): Klimarisiken - Herausforderung für die Schweiz, Schlußbericht des Nationalen Forschungsprojektes 31, v/dlf Hochschulverlag Ag.

Bairlein, F. und W. Winkel (1998): in: J. L. Lozan, H. Grassl, P. Hupfer: Warnsignal Klima – Das Klima des 21. Jahrhunderts. Geo ISBN 3-00-002925-7, pp 464

DWD 2002:
[<http://www.dwd.de>] (Bruns: phenological pie)

Enke, W., Th. Deutschländer und F. Schneider (2004): Eine regionale Klimaprognose für Sachsen und andere Bundesländer. 4. Annaberger Klimatage 2004, 12./13. Mai 2004

Hassol, S.J. (2004): ACIA. Impacts of a Warming Arctic. Cambridge University Press. ISBN 0 521 61778

IPCC (2001): Climate Change 2001. Synthesis Report. Cambridge University Press 2001 und Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001. Third Assessment Report. WG I

Latif, M. (2004): Simulationen zum globalen Klimawandel, 4. Annaberger Klimatage 2004, 12./13. Mai 2004

ÖGM (2003): Klimaerklärung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie und der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie

Overpeck, J. T., B. L. Otto-Bliesner, G. H. Miller, D. R. Muhs, R. B. Alley and J. T. Kiehl (2006): Paleoclimatic Evidence for Future Ice-Sheet Instability and Rapid Sea-Level Rise. Science 24 March 2006, Vol. 311. no. 5768, pp. 1747 – 1750

Prudence (2006): Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects PRUDENCE (EVK2-CT2001-00132) Final Report. Co-ordinator: Dr. Jens Hesselbjerg Christensen
[<http://prudence.dmi.dk>]

Schär, Ch., P.L. Vidale, D. Lüthi, Ch. Frei, Ch. Häberli, M.A. Liniger and Ch. Appenzeller (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. Nature, Vol. 427, pp 332 - 334

Schönwiese, Ch. D., J. Grieser, J. Rapp, T. Staeger und S. Trömel (2004): Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland, 4. Annaberger Klimatage 2004, 12./13. Mai 2004

Schwartz, P. and R. Randall (2003): An abrupt climate change scenario and its implications for United States national security. Imagining the unthinkable. Study for the US Pentagon, Washington

Swiss Re (2000): Sturm über Europa. Ein Unterschätztes Risiko. Swiss Re Publishing, Zürich

WBGU (2003): Über Kioto hinaus denken. Klimastrategien für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen. Berlin 2003

Internet-Adressen

<http://www.accc.at/>

Homepage des ehemaligen Österreichischen Klimabeirats. Aktuelle Informationen und wichtige Links

<http://www.proclim.unibe.ch>

Homepage des Schweizer Klimaforschungskoordinationszentrums ProClim

<http://www.unfccc.de/>

Sekretariat der UN-Klimakonvention. Offizielle Texte.

<http://www.ipcc.ch>

Intergovernmental Panel on Climate Change: Zusammenfassungen der IPCC Berichte

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

Multinationale Firmen, die sich dem Klimaschutz verpflichtet fühlen

1.5.2 „Peak Oil“

Aleklett, K. and C.J. Campbell (2003): The Peak and Decline of World Oil and Gas Production, Association for the Study of Peak Oil and Gas

www.asponews.org and

[http://www.projectcensored.org/newsflash/the_hirsch_report.pdf]

Bakhtiari, A.M. Samsam (2002): To see birth of New World Energy Order, Oil and Gas Journal, January 7, 2002

Campbell C. J. and J. H. Laherrere (1998): The end of cheap oil. Scientific American, March 1998

[<http://www.dieoff.com/page140.htm>]

Campbell, C. J., F. Liesenborghs, J. Schindler und W. Zittel (2003): Ölwechsel! Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 260 S

Campbell, C.J. (2002): Forecasting Global Oil Supply 2000-2050. Hubbert Center Newsletter #02-3

Deffeyes, K. S. (2001): Peak of world oil production, Paper no. 83-0, Geological Society of America Annual Meeting, November 2001. gsa.confex.com

Engdahl, W. (2002): Mit der Ölwanne zur Weltmacht, Wiesbaden 2002

Illum, K. (2004): Oil-based Technology and Economy - Prospects for the Future; A short introduction to basic issues and a review of oil depletion projections derived from different theories and methods Copenhagen 2004
[www.tekno.dk]

Kromp-Kolb, H. und H. Formayer (2005): Schwarzbuch Klimawandel. EcoWin Verlag, Salzburg. 222 S

Laherrère J.H. (2004): Present and future energy problems. HEC MBA, Sustainable development seminar, Jouy-en-Josas France, Septembre 8-9
[<http://www.hubbertpeak.com/HEC-long.pdf>]

Petroconsultants (ed.), Campbell, C. J. F. and J. H. Laherrère, The World's Oil Supply 1930-2050, Genf, 1995

Savinar, M. (2006): "Life after the Oil crash" or "The Oil Age is Over: What to Expect as the World Runs Out of Cheap Oil, 2005-2050
[<http://www.lifeaftertheoilcrash.net/>]

Schindler, J. und W. Zittel (2000): Fossile Energiereserven (nur Erdöl und Erdgas) und mögliche Versorgungsempässe aus Europäischer Perspektive, (LB-Systemtechnik GmbH) Ottobrunn 2000

Simmons, M.R. (2002): The World's Giant Oilfields, M. King Hubbert Center for Petroleum Supply Studies, Colorado School of Mines, January 2002

Internet-Adressen

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

<http://www.energiekrise.de/>

<http://www.peakoil.net/>

<http://www.wolfatthedoor.org.uk/>

<http://www.wbgu.de/>

<http://www.elstatconsultant.nl/>

2 Umweltbelastung durch den Kernenergiezyklus bei „Normalbetrieb“

Helmut Hirsch und Peter Weish

April 2006, geringfügige Aktualisierungen September 2006

Inhaltsverzeichnis

2	Umweltbelastung durch den Kernenergiezyklus bei „Normalbetrieb“	48
2.1	Einleitung	48
2.2	Das verdrängte Problem - Uranabbau	48
2.3	Normalbetrieb von Atomanlagen	49
2.3.1	Wirkung von Strahlung auf den Menschen	49
2.3.2	Natürliche Strahlung	50
2.3.3	Krebserkrankungen im Nahbereich von Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen	51
2.3.3.1	Erkenntnisse in Deutschland	51
2.3.3.2	Befunde aus anderen Ländern	52
2.3.3.3	Krebserkrankungen in der Umgebung von Sellafield und La Hague	52
2.3.4	Spätfolgen	53
2.4	Literatur	56

2 Umweltbelastung durch den Kernenergiezyklus bei „Normalbetrieb“

2.1 Einleitung

Um Kernkraftwerke zu betreiben, bedarf es eines umfangreichen Systems von technischen Anlagen und Einrichtungen – vom Abbau des Urans bis zur Endlagerung der radioaktiven Abfälle.

Jede Stufe dieses Systems ist mit Belastungen der Umwelt verbunden, auch wenn keine Unfälle eintreten und alle Abläufe plangemäß erfolgen. Bei manchen Anlagen ist allerdings die Abgrenzung zwischen Normalbetrieb und Störungen nicht immer eindeutig, wie unter anderem die häufigen Störfälle bei der Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff belegen.

Die Umweltauswirkungen bei der so genannten Entsorgung werden bereits an anderer Stelle behandelt, ebenso die Auswirkungen schwerer Unfälle in Kernkraftwerken. Hier sollen Bereiche aufgegriffen werden, die bei der Behandlung der Probleme der Atomenergie häufig übersehen werden: Die Brennstoffversorgung, insbesondere der Uranabbau, sowie die Emissionen von Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen im unfallfreien Betrieb.

2.2 Das verdrängte Problem - Uranabbau

Uran ist ein Element, das an vielen Orten in der Natur in Form verschiedener Mineralien vorkommt. Das bedeutet nicht, dass Uran ungefährlich ist. Beim Abbau wird Uran aus Lagerstätten entfernt, die im Allgemeinen in geochemischer Hinsicht stabil sind. Das Erz wird zerkleinert und das Uran in chemischen Verfahren extrahiert.

Uranreste und die gesamten abgetrennten Zerfallsprodukte bleiben zurück und werden oberirdisch in Form von Halden oder als Schlamm in einfachen Becken gelagert. Die Abfallprodukte der Urangewinning enthalten so gefährliche Bestandteile wie das Uran-Tochterprodukt Thorium-230 mit einer Halbwertszeit von 77.000 Jahren – das ist rund das Dreifache der Halbwertszeit von Plutonium-239. Aus Thorium entstehen weitere Zerfallsprodukte wie Radium und das gasförmige Radon.

Die Isolations-Zeiträume, die bei der Endlagerung dieser Abfälle gewährleistet werden müssten, sind durchaus vergleichbar jenen für Abfälle aus dem Betrieb von Kernkraftwerken. Von geologischer Tief Lagerung ist hier – wegen der großen Mengen – jedoch keine Rede.

Je nach dem Urangehalt des Erzes müssen für jede Tonne Brennstoff, wie er in Leichtwasserreaktoren eingesetzt wird, Tausende oder Zehntausende Tonnen Erz abgebaut werden. Die Mengen an radioaktiven Rückständen, die in Abbaugebieten zurückbleiben, sind dementsprechend groß. Beispielsweise lagern in den entsprechenden Regionen in New Mexico (USA) und Wismut (in der ehemaligen DDR) jeweils mehr als 100 Millionen Tonnen radioaktiver Abfälle aus der Urangewinning auf der Oberfläche der Erde.

Die Wismut-Region war so stark verstrahlt, dass dort die Bestimmungen der deutschen Strahlenschutzverordnung nicht angewandt werden konnten. Der Uranbergbau in Ostdeutschland hat insgesamt etwa 8000 Halden und Schlammteiche hinterlassen. Regenwasser wäscht aus den Halden Uran, Radium und andere Schadstoffe aus, die ins Grundwasser gelangen. Wenn die Halden zusammenrutschen, kommt es außerdem zur Freisetzung von strahlendem Staub in die Atmosphäre. Uran geht viele Verbindungen ein, die in Abhängigkeit von ihrer Löslichkeit chemisch toxisch sind.

Die Sanierung dieser Region stellt ein gewaltiges und teures Vorhaben dar, das sich über Jahrzehnte hinzieht. Im Jahre 1990 hat die deutsche Bundesregierung die Verantwortung für die Sanierung übernommen. Bis Ende 2004 hatte das Bundesunternehmen Wismut GmbH rund 4,4 Milliarden Euro ausgegeben. Die Sanierungsarbeiten sind zu über zwei Drittel abgeschlossen. Die Arbeiten müssen jedoch noch für viele Jahre fortgesetzt werden. Mit ihrem Abschluss wird 2015 gerechnet. Langzeitmaßnahmen wie die Behandlung von Wässern und Überwachung der Umwelt werden auch danach noch erforderlich sein [BMVBW 2005].

Die Verhältnisse in anderen Uranabbaugebieten sind dem Zustand der Wismut-Region vor der Sanierung vergleichbar. Da sie häufig in Ländern der Dritten Welt oder in Gegenden von Industriestaaten liegen, die von Ureinwohnern besiedelt sind, werden sie jedoch von einer kritischen Öffentlichkeit nicht in dem Maße beachtet, wie das in Deutschland der Fall ist, und auch nicht mit großem Aufwand saniert.

2.3 Normalbetrieb von Atomanlagen

2.3.1 Wirkung von Strahlung auf den Menschen

Die zunehmende radioaktive Kontamination der Biosphäre, als Folge radioaktiver Emissionen aus dem Routinebetrieb kerntechnischer Anlagen sowie nach Unfällen verursacht eine wachsende Strahlenbelastung auch des Menschen. Da es für die Auslösung von Strahlenspätchäden keine unschädliche Dosis gibt, ist jede Erhöhung der Strahlenbelastung grundsätzlich bedenklich.

Der Mensch steht im Mittelpunkt der folgenden Ausführungen, weil er zu den strahlenempfindlichsten Organismen gehört. Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass u. U. auch andere Lebewesen von Strahlenfolgen stark betroffen sein können.

Die Wirkung ionisierender Strahlung auf lebende Zellen ist am ehesten einem Hagel winziger Geschosse vergleichbar, die dort, wo sie auftreffen, Biomoleküle oder Zellstrukturen verändern. Das Verständnis strahlenbiologischer Vorgänge wurde dementsprechend wesentlich durch Einführung des so genannten Trefferprinzips gefördert, das die diskontinuierliche Natur der Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit der Materie widerspiegelt [Timofeoff-Ressovsky und Zimmer 1947]. Das Ausmaß des Strahlenschadens in einer Zelle hängt entscheidend von der absorbierten Dosis (der Zahl der Treffer) und darüber hinaus davon ab, welche Strukturen oder Biomoleküle verändert wurden (Ort der Treffer). Daneben gibt es auch indirekte Strahlenschäden, die von strahlenchemisch gebildeten Zellgiften wie Wasserstoffperoxid oder Radikalen verursacht werden. Die Bestrahlung des ganzen Körpers mit Dosen von einigen hundert Rem (bzw. einigen Sievert, der neueren Einheit der Äquivalenzdosis) schädigt empfindliche Organsysteme wie etwa das Darmepithel oder das rote Knochenmark durch Störung der Teilungsfähigkeit oder

Abtöten von Zellen so stark, dass infolge des Ausfalls von Zellen nach Tagen bis Wochen der Tod eintritt. Die Energiemenge, die dabei wirksam wird, ist vergleichsweise gering. Eine tödliche Strahlendosis überträgt auf den Körper weniger Energie, als etwa eine Tasse Tee ($1 \text{ rad} = 2,388 \cdot 10^{-6} \text{ cal/g}$). Eine tödliche Dosis von 1000 rad (10 Gray) bei einem Menschen mit 70 kg Körpergewicht ergibt daher eine übertragene Energie von $1000 \times 70 \text{ 000} \times 2,388 \times 10^{-6} = 167 \text{ cal}$. Das bedeutet eine Erwärmung des Körpers um $0,0024 \text{ }^\circ\text{C}$). Hohe Dosen rufen die akute Strahlenkrankheit mit typischen Symptomen hervor, die unterhalb bestimmter Schwellenwerte der Dosis nicht in Erscheinung treten.

Folgeschwer kann sich die Schädigung des Erbmaterials einer Zelle auswirken. Die Desoxyribonukleinsäure (DNS) des Zellkerns, deren arttypische Struktur die Erbinformation beinhaltet, kann schon durch eine einzige Ionisation chemisch verändert werden. Dies kann sich dann bei der, jeder Zellteilung vorangehenden DNS-Biosynthese, wobei die Struktur des vorhandenen Moleküls als Matrize für das neu aufzubauende dient, als „Druckfehler“ in der Erbinformation manifestieren. Wird der Organismus niedrigen Dosen ionisierender Strahlung ausgesetzt, so sind keine Symptome der akuten Strahlenkrankheit zu beobachten. Es werden nur sehr wenige Zellen abgetötet, was für den Körper praktisch ohne Bedeutung ist. Es können jedoch strahlengeschädigte Zellen überleben, die bei ihrer Teilung einen Defekt weitervererben und auf diese Weise „biologisch verstärken“. Die Wirkung selbst tritt erst nach vielen Zellgenerationen in Form von Missbildungen, Krebs, Leukämie oder Erbkrankheiten in Erscheinung. Man spricht deshalb von Strahlenspätchäden. Der zeitliche Abstand zwischen Strahlenereignis und sichtbarem Schaden (die Latenzzeit) beträgt bei verschiedenen Krebsformen bis zu vielen Jahren, bei Erbschäden sogar bis zu vielen Generationen.

Der bewährte Grundsatz des Paracelsus: „*Nur die Dosis macht das Gift*“ verliert also bei energiereicher Strahlung (und zwar im niedrigen Dosisbereich) seine Gültigkeit. Aufgrund von Experimenten und theoretischen Überlegungen sowie der Auswertung medizinischer Statistiken über die Wirkung von Niedrigstrahlung ist nach dem Stand der Wissenschaft kein Dosis-Schwellenwert ionisierender Strahlung in Hinblick auf somatische Spätchäden (Krebs, Leukämie), Missbildungen und genetische Effekte anzunehmen. Es gibt keine unschädliche Dosis.¹ Der Vorgang, der eine normale Zelle in eine potentielle Krebszelle bzw. in die Vorstufe einer mutierten Keimzelle verwandelt, kann als „Eintreffer-Ereignis“ aufgefasst werden. Die Frage: „Welche Dosis ist ungefährlich?“ ist ebenso wenig sinnvoll wie: „Welche Intensität von Beschuss mit Gewehrkegeln ist ungefährlich?“ Das Auftreten von Treffern ist in beiden Fällen eine Frage der Statistik. Bei Niedrigstrahlung ist die Strahlung nicht schwächer, sondern der „Hagel winziger Geschosse“ ist nur weniger dicht. Die Treffer ereignen sich zwar seltener, die Trefferwahrscheinlichkeit pro Geschöß ist jedoch unverändert. Das versteht man unter linearer Dosis-Wirkungs-Beziehung. Verdünnung von Radioaktivität und Verteilung der resultierenden Strahlenbelastung auf eine größere Zahl von Individuen - etwa durch hohe Abluftkamine kerntechnischer Anlagen - verringert zwar das individuelle Risiko eines Strahlenspätchadens mit Krankheits- oder Todesfolge, die Risikogruppe wird jedoch größer und die Gesamtzahl der Gesundheitsschäden bleibt gleich.

2.3.2 Natürliche Strahlung

In der Auseinandersetzung um die Kernenergie wird häufig auf die Tatsache verwiesen, dass die Menschheit seit jeher einer regional unterschiedlichen Strahlenbelastung aus natürlichen

¹ Zu diesem Thema existiert eine reichhaltige Literatur. Siehe etwa UNSCEAR Reports oder Gofman (1981) oder Weish et. al (1986).

Quellen ausgesetzt war. Diese natürliche Strahlung habe offensichtlich nicht geschadet und sei daher ein brauchbarer Maßstab für eine akzeptable zusätzliche Strahlenbelastung aus der Kernindustrie. Dem ist entgegen zu halten, dass eine Vielzahl eingehender Untersuchungen eine Beziehung zwischen hoher natürlicher Strahlenbelastung und vermehrtem Auftreten verschiedener Gesundheitsschäden aufgezeigt hat. Natürliche Strahlung ist demnach nicht unschädlich, ihr ist ein Teil der „spontan“ auftretenden Krebs- und Leukämiefälle sowie Erbkrankheiten zuzuschreiben. Sie ist aber auch insofern kein tauglicher Maßstab zur Rechtfertigung zusätzlicher Belastung, als wir für ihre Folgen keine Verantwortung tragen. Aus dem Vorhandensein von Gefahren kann nicht die Rechtfertigung ihrer Vermehrung abgeleitet werden.

2.3.3 Krebserkrankungen im Nahbereich von Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen

Die Frage einer erhöhten Krebshäufigkeit in der Nachbarschaft von Atomanlagen wird seit vielen Jahren kontrovers diskutiert. Nach wie vor führen wissenschaftliche Untersuchungen zu den unterschiedlichsten Ergebnissen. Seit den frühen 90er Jahren mehren sich jedoch bei Kernkraftwerken die Hinweise, die auf erhöhte Krebsraten hindeuten.

2.3.3.1 Erkenntnisse in Deutschland

So zeigte etwa eine Studie des Institutes für Medizinische Statistik in Mainz aus dem Jahr 1997, dass die Häufigkeit von Leukämieerkrankungen bei Kindern in der Umgebung deutscher Kernkraftwerke signifikant erhöht ist [BMU 1998]. Ein besonders drastisches Beispiel dafür ist das Kernkraftwerk Krümmel, in dessen Umgebung seit 1990 17 Fälle von Leukämie bei Kindern und Jugendlichen auftraten.

Ein derartiges Zusammentreffen stellt einen wichtigen Hinweis dar, belegt jedoch nicht definitiv, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen Atomanlage und Krankheitsfällen besteht.

Die Strahlenbelastungen, die aus den offiziellen Ergebnissen der Emissions- und Immissionsüberwachung abgeleitet werden können, wären viel zu niedrig, um diese Erkrankungen zu erklären. Andererseits ist es jedoch möglich, dass radioaktive Aerosole unbemerkt durch den Kamin abgegeben wurden und werden, da die Überwachung des Abluftstromes derartige Partikel nicht zuverlässig erfasst. Diese Schwachstelle könnte prinzipiell auch bei anderen Kernkraftwerken bestehen.

In der gleichen Region befindet sich ein großes Kernforschungszentrum (GKSS), das ebenfalls die Quelle von nicht erfassten radioaktiven Emissionen, die Leukämie verursachen, sein könnte.

Auch umfassende Untersuchungen, die im Auftrag der Landesregierungen von Schleswig-Holstein und Niedersachsen durchgeführt wurden, konnten die Frage nicht definitiv klären, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen den Emissionen von Krümmel und/oder GKSS und den Krebsfällen in der Umgebung besteht [Strahlentelex 2003]. In den letzten Jahren konzentrierte sich die Diskussion mehr auf das Forschungszentrum und insbesondere auf einen Unfall, der sich dort, wie ExpertInnen berichten, 1986 zugetragen haben soll. Gleichzeitig treten immer wieder neue Fälle von Leukämie auf. Der letzte der 17 oben erwähnten Fälle wurde im Februar 2006 bekannt [Strahlentelex 2006].

Erst vor kurzem bestätigte das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz Ergebnisse des Umweltinstitutes München, dass in der Umgebung der bayrischen Atomkraftwerke vermehrt Krebserkrankungen bei Kindern auftreten. Für den Zeitraum von 1983 bis 1998 wurde in den, den Atomkraftwerken benachbarten Landkreisen eine Erhöhung aller kindlichen Krebserkrankungen um 20 % festgestellt. Das Bundesamt für Strahlenschutz lässt die Frage möglicher Häufungen von Krebserkrankungen nun bundesweit untersuchen, im Rahmen einer umfassenden Fall-Kontroll-Studie. Der Auftrag dazu wurde 2002 erteilt. Die Studie soll in der zweiten Hälfte 2006 abgeschlossen werden [Grosche et al. 2002; Krebsregister 2006; Umweltinstitut 2006].

2.3.3.2 Befunde aus anderen Ländern

In den USA wurde 2001 von einem deutlichen Rückgang der Säuglingssterblichkeit in der Nähe von fünf Atomreaktoren berichtet, nachdem diese stillgelegt worden waren [Strahlentelex 2002]. Eine Untersuchung der Krebsraten bei Kindern in der Umgebung (48 km-Umkreis) von 14 Standorten mit insgesamt 24 Reaktoren zeigte eine Erhöhung um 12,4 % gegenüber dem Durchschnittswert. Auch die AutorInnen dieser Studie heben die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen hervor, betonen jedoch, dass ihre Ergebnisse bereits deutliche Hinweise („strong evidence“) darstellen [Mangano et al. 2002].

Mitte der 90er Jahre wurde auch aus Japan über erhöhte Leukämiehäufigkeit in der Umgebung von Kernkraftwerken berichtet. Anfang der 90er Jahre wurden in der Umgebung eines kanadischen Kernkraftwerkes (Pickering/Ontario) gehäufte Fälle des Down-Syndrom (früher als Mongolismus bezeichnet) beobachtet, einige Jahre vorher vermehrtes Auftreten von Krebs bei Kindern und Jugendlichen in der Nähe der schottischen Atomanlagen in Dounreay².

Eine kürzlich abgeschlossene Studie von Krebsfällen in der Nachbarschaft des Kernkraftwerkes Trawsfynydd in Wales zeigt einen deutlichen Anstieg von Brustkrebs bei Frauen, Prostatakrebs bei Männern, Leukämie und anderen Krebsarten [Busby 2006].

2.3.3.3 Krebserkrankungen in der Umgebung von Sellafield und La Hague

Eine im Auftrag des Europäischen Parlamentes erstellte Studie stellte 2001 fest, dass in der Umgebung der britischen Wiederaufarbeitungsanlage Sellafield, insbesondere in Seascale, definitiv eine Erhöhung der Zahl der kindlichen Krebsfälle gegeben ist. Bisherige Untersuchungen waren nicht in der Lage, die Ursache zu klären und insbesondere den Zusammenhang mit der Atomanlage definitiv zu bestätigen oder zu widerlegen. Weitere Untersuchungen werden für erforderlich gehalten [Schneider et al. 2001].

Anfang 2004 wurden weitere Beobachtungen erhöhter Krebshäufigkeit in der Umgebung von Sellafield veröffentlicht. Es handelt sich um die Küstenstadt Caernarfon und deren Umgebung an der Irischen See, südwestlich von Liverpool gelegen. Die dort festgestellte Leukämierate liegt noch über jener von Seascale [Strahlentelex 2004].

In der Umgebung der französischen Wiederaufarbeitungsanlage La Hague (Gebiet Beaumont-Hague) wurde Mitte der 90er Jahre ein erhöhtes Auftreten von Leukämie in der Altersgruppe von 0 bis 24 Jahren festgestellt. Eine Untersuchung möglicher Ursachen zeigte eine positive Korrelation des Risikos, an Leukämie zu erkranken, mit häufigen Aufenthalten der Kinder bzw.

² Zur Situation in Großbritannien siehe auch: Busby, Ch. (1995)

deren Mütter (während der Schwangerschaft) an lokalen Stränden sowie mit der Konsumption von Fisch und Muscheln aus der Gegend. 1997 zogen die Autoren dieser Untersuchung den Schluss, dass es überzeugende Hinweise auf Strahlung als Ursache der erhöhten Leukämierate gäbe [Pobel et al. 1997].

Eine von der französischen Regierung in Auftrag gegebene Studie [GRNC 1991] bestätigte diese Ergebnisse nicht. Die Aussagekraft dieser Studie war allerdings sehr begrenzt, da eine Reihe von wichtigen Belastungspfaden nicht berücksichtigt wurde. Im Sommer 2001 wurde schließlich eine neue epidemiologische Studie veröffentlicht, die von verschiedenen staatlichen Stellen (darunter die Direction Générale de la Santé) gefördert worden war und die Aussagen von 1997 bestätigte. Weitere Untersuchungen wurden gefordert³. In den letzten Jahren wurden allerdings keine neuen Berichte zu diesem Thema veröffentlicht. Es bleiben offene Fragen.

Die Liste solcher Beispiele könnte noch fortgesetzt werden. Sie deuten allesamt darauf hin, dass auch im störungsfreien Betrieb die radioaktiven Emissionen von Kernkraftwerken und anderen Atomanlagen eine nicht zu vernachlässigende Zahl von Gesundheitsschäden verursachen – selbst wenn allem Anschein nach die gültigen Grenzwerte für die Emissionen eingehalten werden.

Die Ursache könnte darin liegen, dass die Wirkung radioaktiver Niedrigstrahlung bisher systematisch unterschätzt wurde, oder dass nicht sämtliche Emissionen zuverlässig von der Überwachung erfasst werden. Denkbar ist auch eine Kombination dieser beiden Faktoren.

2.3.4 Spätfolgen

Während Krebs oder Leukämie (somatische Strahlenschäden) mit dem Individuum absterben, akkumulieren erbliche Defekte in der menschlichen Population. Insbesondere im Zivilisationsmilieu kommt es zu einer Zunahme der genetischen Bürde.

Geht ein Organismus aus mutierten Keimzellen hervor, so trägt er den Erbschaden in allen Zellen seines Körpers und gibt ihn auch an seine Nachkommen weiter. Durch Behandlung können die Symptome von Erbkrankheiten zwar in vielen Fällen gelindert oder unterdrückt werden, eine Heilung ist aber mit Sicherheit auszuschließen.

Die strahlenbiologische Forschung hat Mechanismen entdeckt, die Defekte in der DNS reparieren können. Unter Hinweis auf diese Reparaturmechanismen wird gelegentlich die Behauptung aufgestellt, Niedrigstrahlung sei für den Menschen genetisch unbedenklich. Diese These ist aus mehreren Gründen unhaltbar:

- Die Reparaturmechanismen arbeiten nicht mit hundertprozentigem Wirkungsgrad. Von Genschäden bleibt jedenfalls ein nicht reparierter Anteil bestehen. Das haben nicht nur Experimente ergeben,⁴ sondern das geht allein schon aus der Existenz der spontanen Mutationsrate hervor und aus dem Vorhandensein von Erbkrankheiten.

³ Zur genaueren Darstellung der in diesem Absatz gegebenen Abläufe siehe Schneider et al. (2001), Kapitel 6.5.2.3 u. 6.5.2.4

⁴ Siehe etwa Timofeeff-Ressovsky, N. V., Ivanov, V. I., Korogodin, V. J. (1972)

- In vielfältigen strahlen genetischen Experimenten wurde nachgewiesen, dass die Zahl der (nicht reparierten) Mutationen der Strahlendosis ohne Schwellenwert proportional ist.⁵ Selbst die Reparatur der DNS muss nicht fehlerlos sein. Einer der bekannten Reparaturmechanismen, der DNS-Strangbrüche zusammenflickt, wird deshalb auch als „error prone“ bezeichnet [Calkins 1977]. Reparatur bewirkt daher in manchen Fällen, dass Zellen, die wegen eines DNS-Schadens aus der Keimbahn ausgeschieden wären, überlebens- und teilungsfähig werden und leistet daher auf diese Weise sogar einen Beitrag zur Erhöhung der Mutationsrate.

Wegen der biochemischen und molekularbiologischen Ähnlichkeit der Organismen sind aus zahlreichen strahlen genetischen Untersuchungen an Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren zwar einerseits viele allgemeine strahlen genetische Gesetzmäßigkeiten bekannt, andererseits ist aber eine quantitative Abschätzung der mutationsauslösenden Wirkung von Strahlung auf den Menschen unter anderem aus folgenden Gründen schwer bis unmöglich:

- Auffallende dominante⁶ Erbkrankheiten sind relativ selten. Sie stellen nur die „Spitze eines Eisbergs“ dar.
- Weitaus häufiger sind rezessive Mutationen, die vom gesunden entsprechenden Gen des anderen Elternteils überdeckt werden. Rezessive Mutationen treten dann in Erscheinung, wenn die defekten Gene von beiden Eltern an einen Nachkommen vererbt wurden.⁷ Rezessive Mutationen lassen sich in Kreuzungsexperimenten an Organismen mit kurzer Generationsdauer nachweisen. Beim Menschen ist ihr Nachweis nur ausnahmsweise möglich.
- Daher bleiben die meisten Erbschäden viele Generationen lang unerkannt, bis sie einmal homozygot auftreten.
- Die lange Generationsdauer des Menschen erschwert Beobachtungen.
- Da die meisten Krankheiten genetische Komponenten haben, wird eine erhöhte Mutationsrate beim Menschen nicht nur die Zunahme einiger seltenen Erbkrankheiten verursachen, sondern einen Anstieg sehr vieler „normaler“ Krankheiten.
- Während ein von Strahlung induzierter Krebsfall „nur“ einen einzelnen Menschen betrifft - so tragisch dies auch sein mag - kann eine einzige strahleninduzierte Mutation für viele, in künftigen Generationen lebende Menschen unheilbare Krankheit oder Behinderung bedeuten.
- In einer wachsenden Population entfalten langfristig gerade wenig einschneidende Erbdefekte, die die Fortpflanzungswahrscheinlichkeit nicht verringern, eine insgesamt größere negative Wirkung, da sie nicht ausgeschieden werden, wie genetische Letalfaktoren.

⁵ Dieser Effekt wurde von Hermann Joseph Muller entdeckt, der dafür 1946 den Nobelpreis erhielt: Muller, H. J. (1927).

⁶ Als dominant werden Erbanlagen bezeichnet, die auch dann in Erscheinung treten, wenn sie nur von einem Elternteil vererbt wurden. Sie überdecken die Erbanlage des anderen Elternteils, die man dann rezessiv nennt.

⁷ Die medizinische Forschung hat die genetische Natur vieler Stoffwechselkrankheiten aufgeklärt. Ein gutes Beispiel ist die Sichelzellenanämie, die erste Erbkrankheit, deren biochemische Ursache genau erforscht wurde. In der Beta-Polypeptidkette des Hämoglobin A, die aus einer Abfolge von 146 Aminosäuren besteht, ist in Position 6 statt Glutaminsäure Valin vorhanden. Ein minimaler „Druckfehler“ in der Erbinformation, ein einziger „falscher Buchstabe“, ist somit Ursache einer schweren, unheilbaren Krankheit, wenn beide Eltern den gleichen Gen-Defekt an einen Nachkommen vererben.

Aus diesen Gründen haben Genetiker schon vor geraumer Zeit vor einer zunehmenden Strahlenbelastung des Menschen gewarnt.

„Genetiker werden oft gefragt, welche Strahlendosis toleriert werden könnte. Die Antworten sind unterschiedlich und werden meist nur widerstrebend gegeben, denn es gibt auf diese Frage keine Antwort. Abgesehen von der Tatsache, daß das heute vorliegende Versuchsmaterial zwar eindeutig Erzeugung schädlicher Mutationen durch Strahlung beweist, aber für quantitative Aussagen den Menschen betreffend noch recht unvollkommen ist, müßte für eine solche Antwort festgelegt sein, ob wir eine Verdopplung, Verzehnfachung oder Verhundertfachung der heute durch Spontanmutationen bedingten Fehlgeburten, Mißbildungen und Erbkrankheiten für „tragbar“ halten. Entscheidend in unserer Verantwortung für spätere Generationen ist die Tatsache, daß erst nach genügender Verbreitung der rezessiven Defekte durch weitere Fortpflanzung der heutigen Menschheit die Katastrophe über unsere Enkel und Urenkel hereinbrechen kann, auch wenn wir heute den Eindruck einer normalen Situation haben.“ [Bresch 1970].

Leider sind die Zusammenhänge zwischen Niedrigstrahlung und genetischen Schäden zwar unstrittig gegeben, jedoch sehr komplexer Natur und im Einzelfall nicht nachzuweisen.

Sowohl im Hinblick auf Krebserkrankungen, als auch auf genetische Spätfolgen bleibt es komplex und schwierig, kausale Verbindungen zwischen dem Normalbetrieb von Atomanlagen und Erkrankungen direkt nachzuweisen. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass die Belege für einen solchen Zusammenhang im Laufe der Jahre immer deutlicher geworden sind.

2.4 Literatur

BMU (1998): Epidemiologische Studien zum Auftreten von Leukämieerkrankungen bei Kindern in Deutschland; Bundesumweltministerium, BMU-1997-489; siehe dazu auch Strahlentelex, 12. Jahrgang, Nr. 264-265, Januar 1998, 4

Busby, Ch. (1995): Wings of death – Nuclear Pollution and Human Health. Green Audit Books Aberystwyth, Wales

Busby, Ch. et al. (2006): A Survey of Cancer in the Vicinity of Trawsfynydd Nuclear Power Station in North Wales; Report 2006/3, Green Audit Aberystwyth, June 2006 ([www.llrc.org], eingesehen am 11. September 2006)

Bresch, C. (1970): Klassische und Molekulare Genetik. Springer

Calkins, J. (1977): General patterns of repair and their possible significance as necessary protection from environmental radiation exposure. In: Radioprotect. chem. comp. biol. means (A. Locker u. K. Fleming ed.) Birkhäuser 1977, S. 19-29

Gofman, J.W. (1981): Radiation and Human Health, Sierra Club Books

GRNC (1991): Estimation des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants et des risques de leucémies associées de populations du Nord-Cotentin, Rapport de Synthèse, Octeville, Juillet 1991

Grosche, B. et al. (2002): Häufigkeit kindlicher Krebserkrankungen in der Umgebung von Atomkraftwerken in Bayern; BfS-SH-04/2002, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2002

BMVBW (2005): Jahresbericht der Bundesregierung zum Stand der Deutschen Einheit 2005; September 2005
[www.bmwbw.de/Anlage/original_939535/Jahresbericht-2005-zum-Stand-der-Deutschen-Einheit.pdf]

Krebsregister (2006): [www.krebsregister.de], eingesehen am 11. September 2006

Mangano, J.J., et al. (2002): Elevated childhood cancer incidence proximate to U.S. nuclear power plants; Archives of Environmental Health, Feb. 2003
[www.findarticles.com/p/articles/mi_m0907/is_2_58/ai_106471710/]

Muller, H. J. (1927): Artificial mutation of the gene. Science 66. 84

Pobel, D., & Viel, J.F.: Case-control study of leukemia among young people near La Hague nuclear reprocessing plant – the environmental hypothesis revisited; British Medical Journal, Vol. 314, 11 January 1997, 101-106

Schneider, M. et al. (2001): Possible Toxic Effects from the Nuclear Reprocessing Plants at Sellafield (UK) and Cap de la Hague (France); EP/IV/A/STOA/2000/17/01, Europäisches Parlament, STOA Unit, November 2001, Kapitel 5.6.5

Strahlentelex (2002), 16. Jahrgang, Nr. 364-365, März 2002, 6

Strahlentelex (2003), 17. Jahrgang, Nr. 392-393, Mai 2003, 5-6

Strahlentelex (2004), 18. Jahrgang, Nr. 412-413, März 2004, 3

Strahlentelex (2006), 20. Jahrgang, Nr. 462-463, April 2006, 3

Timofeeff-Ressovsky, N. V., V. I. Ivanov und V. J. Korogodin, (1972): Die Anwendung des Trefferprinzips in der Strahlenbiologie. Fischer Verl. Jena

Timofeeff-Ressovsky, N. W. und K. G. Zimmer (1947): Das Trefferprinzip in der Biologie. S. Hirzel, Leipzig

Umweltinstitut (2006): [www.umweltinstitut.org], eingesehen am 11. September 2006

Weish, P. und Gruber, E. (1986): Radioaktivität und Umwelt. Fischer, Stuttgart

3 Nukleare Sicherheit

**Georgui Kastchiev, Roman Lahodynsky, Nikolaus Müllner,
Wolfgang Kromp, Helga Kromp-Kolb**
Juli 2006, Ergänzungen Januar 2007

Inhaltsverzeichnis

3	Nukleare Sicherheit	60
3.1	Motivation	60
3.2	Kernkraftwerkskonzepte und deren wichtigste generische Schwachstellen hinsichtlich schwerer Unfälle	61
3.2.1	Überblick	61
3.2.2	Wichtige generische Schwachstellen hinsichtlich schwerer Unfälle aktuell betriebener Kernkraftwerke (Generationen I und II)	63
3.2.2.1	DWR & WWER	63
3.2.2.2	SWR	64
3.2.2.3	RBMK	64
3.2.2.4	Schwerwasser-moderierte Druckwasserreaktoren	65
3.2.2.5	Gasgekühlte Reaktoren	65
3.2.2.6	Schnelle Reaktoren	65
3.2.3	Allgemeine Betrachtungen zur Sicherheit der Kraftwerke der Generation III und IV (Fortgeschrittene Reaktoren)	66
3.2.4	Zwischenbilanz	69
3.3	Gefahren	69
3.3.1	Anlageninterne Ereignisse	69
3.3.2	Gefährdung durch externe Ereignisse	70
3.3.2.1	Externe Naturgefahren	71
3.3.2.2	Externe anthropogene Gefahren	72
3.3.3	Feindliche Handlungen	72
3.4	Unfälle in Kernkraftwerken und „Beinahe-Unfälle“	74
3.4.1	Schwere Unfälle in Kernkraftwerken	74
3.4.2	Chronologie der jüngeren Ereignisse	74
3.4.3	Gemachte und noch nicht gemachte Hausaufgaben	76
3.5	PSA, deren Ergebnisse und Implikationen	78
3.6	Sicherheitsstandards	81
3.6.1	Frühe Entwicklung der Sicherheitsstandards	81
3.6.2	Aktuelle Sicherheitsstandards, -ziele und -vorgaben	82
3.6.3	Einhaltung der Sicherheitsziele und Sicherheitsstandards	83
3.7	Künftiges Sicherheitsniveau von Kernkraftwerken und sich abzeichnende Probleme	85
3.7.1	Alterung von Kernkraftwerken	85
3.7.2	Verringerung des Know-how und der Infrastrukturkapazitäten	85
3.7.3	Liberalisierung des Strommarktes / Senkung der Sicherheitsfaktoren	86
3.7.4	Wissensmanagement	87
3.7.5	Seismische Gefährdung	88
3.7.6	Klimawandel	89
3.7.7	Zunehmende soziale und politische Instabilität	90
3.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	90
3.9	Literatur	94

3 Nukleare Sicherheit

3.1 Motivation

Der Unfall im Tschernobyl-Reaktor 1986 zeigte, dass die wirtschaftlichen, ökologischen, gesundheitlichen, etc. Folgen eines Kernkraftwerksunfalls sehr schwerwiegend sein und große Gebiete für lange Zeit belasten können. Die Ausgaben z.B. Weißrusslands zur Bekämpfung der Auswirkungen von Tschernobyl machten sogar 10 Jahre nach dem Unfall mehr als 10 % des Staatshaushalts aus [Rolevich et al. 1996].

Auch der Generaldirektor der IAEO [El Baradei, 1999] hat eingeräumt, dass die Konsequenzen schwerer Reaktorunfälle grenzüberschreitend sind: *„Atomunfälle respektieren keine Staatsgrenzen, eine Tatsache, auf welche die internationale Gemeinschaft durch den Unfall von Tschernobyl aufmerksam gemacht wurde.“*

Die Schätzungen für die Häufigkeit eines schweren Unfalles mit großer Radioaktivitätsfreisetzung in die Umwelt liegen zwischen ein Mal in 100.000 (oder 10^{-5}) bis ein Mal in 10.000.000 (oder 10^{-7}) Jahren, je nach Reaktortyp, Wartung, Standortcharakteristika, und anderen Einflussfaktoren. Noch vor wenigen Jahren wurden auch Zahlen im Bereich von 10^{-3} und 10^{-4} genannt. In all diesen Zahlen sind nicht alle möglichen Auslöser für derartige Unfälle berücksichtigt, insbesondere schließen sie gezielte Angriffe nicht mit ein. Es besteht eine generelle Übereinstimmung, dass es unmöglich ist, Terror- und Sabotageakte in probabilistischen Risikoanalysen zu berücksichtigen, da es keine sinnvolle quantitative Einschätzung zu deren Wahrscheinlichkeit gibt. Dasselbe gilt selbstverständlich für Kriegshandlungen.

Angesichts der Folgen schwerer Reaktorunfälle mit großen radioaktiven Freisetzungen in die Umwelt, muss jede Bewertung des nuklearen Risikos den gesamten Kraftwerkspark von etwa 440 weltweit betriebenen Kernkraftwerken einbeziehen, im Falle einer beachtlichen Renaissance der Kernenergie den dann noch größeren Kernkraftwerkspark.

Eine relativ geringe Eintrittswahrscheinlichkeit und katastrophale Konsequenzen charakterisieren also das Risiko schwerer Unfälle, das von Kernkraftwerken (KKW) ausgeht. In der systematischen Kategorisierung von Risikotypen der Sozialwissenschaft [Renn et al. 1998], fällt dieses Risiko in die Kategorie „Damokles“ [WBGU 1998]. Auch andere nukleare Anlagen, die mit der Kernenergienutzung zusammenhängen, wie etwa Wiederaufbereitungsanlagen und Lagerstätten für radioaktive Abfälle, werden zu demselben Risikotyp gezählt.

Vielfältige Risiken - nicht in diesem Bericht behandelt - umfassen den gesamten Brennstoffzyklus kommerzieller und militärischer Reaktoren, sowie von Forschungsreaktoren (Erzabbau, Uranerzaufbereitung und -konversion, Anreicherung, Wiederaufarbeitung, Management radioaktiven Abfalls und abgebrannter Brennelemente) beginnend beim Uranabbau bis zum endgültigen Ausstieg aus der Kernenergie. Aber selbst danach werden die Risiken, die mit der Lagerung von nuklearem Abfall zusammenhängen, als Langzeitverpflichtung über Zeiträume geologischer Dimension erhalten bleiben. Die militärische Nutzung von Kernenergie bringt zusätzliche Aspekte mit sich, wie z.B. die Sicherheits und Nicht-Weiterverbreitungsfragen, die auch Auswirkungen auf die zivilen nuklearen Anlagen haben. Einige dieser Fragen werden in anderen Beiträgen dieser Publikation behandelt.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist es, einen Überblick über den aktuellen Stand der Sicherheit ausschließlich von zivil genutzten Kernkraftwerken zu geben.

3.2 Kernkraftwerkskonzepte und deren wichtigste generische Schwachstellen hinsichtlich schwerer Unfälle

3.2.1 Überblick

Im April 2006 waren weltweit 443 Reaktoren zur Stromproduktion in Betrieb und 27 Reaktorblöcke in Bau (IAEA Power Reactor Information System, PRIS, data). Diese 443 Reaktoren verfügten insgesamt über die elektrische Kapazität von 370 GW und erzeugten 16 % der weltweit insgesamt produzierten Strommenge. In acht Ländern werden mehr als 40 % der gesamten Stromproduktion nuklear erzeugt, wobei alle acht europäischen Länder sind (Belgien, Bulgarien, Frankreich, Litauen, Schweden, Schweiz, Slowakische Republik und Ukraine). Von den sechzehn Ländern, die mehr als 25 % Nuklearstromanteil haben, sind dreizehn in Europa.

Die Reaktoren, die zur Zeit betrieben werden, unterteilen sich grob in sechs Typen¹:

- Druckwasserreaktoren (DWR und WWER);
- Siedewasserreaktoren (SWR);
- Leichtwassergekühlte, graphitmoderierte Druckröhren-Siedewasserreaktoren (mit vertikalen Druckröhren, RBMK);
- Schwerwasser-moderierte Druckwasserreaktoren (mit horizontalen Druckröhren, SMDWR);
- gasgekühlte Reaktoren (MAGNOX und AGR); und
- Schnelle Natrium-gekühlte Brüter.

Eine Abfolge von „Generationen“ spiegelt die Entwicklung der Reaktorkonzepte wieder:

Generation I: Einige frühe Kernkraftwerke der Generation I sind noch im Betrieb, doch der Großteil soll in der nächsten Zukunft stillgelegt werden. Die erste Generation von Kernreaktoren waren Experimentalreaktoren mit geringer Leistung, mit deren Hilfe Erfahrungen für die Errichtung der ersten Serien von Kernreaktoren der folgenden Generation gewonnen werden sollten.

Generation II: Abgesehen von einigen Ausnahmen wird der Großteil der zur Zeit betriebenen Reaktoren korrekterweise als Generation II klassifiziert, obwohl sie unterschiedliche Sicherheitsniveaus erreichen. Die Unfälle in Kernkraftwerken dieser Generation - Three Mile Island (TMI-2) und Tschernobyl (Tschernobyl-4) - unterstreichen die Bedeutung der Sicherheit.

¹ Die 204 in Europa in Betrieb befindlichen Blöcke sind 92 DWR, 56 WWER, 19 SWR, 12 RBMK, 1 Schwerwasserreaktor, 22 gasgekühlte Reaktoren und 2 Schnelle Brüterreaktoren.

Generation III: Die Reaktorkonzepte der Generation II wurden modifiziert, um eine Reihe von vorhersehbaren Unfällen passiv beherrschen zu können und die Kernschmelzhäufigkeit (CDF – Core Damage Frequency) auf Werte von bis zu $1,7 \times 10^{-7}$ (AP-600, siehe [NRC-1]) zu reduzieren. Vier Reaktorblöcke der Generation III sind in Japan in Betrieb, wobei alle „Fortgeschrittene Siedewasserreaktoren“ (ABWR – Advanced Boiling Water Reactors) sind. Ein Reaktor der Generation III (EPR) wird in Olkiluoto in Finnland errichtet und ein EPR ist für den Standort Flamanville in Frankreich vorgesehen.

Generation III+: Die Liberalisierung des Strommarktes und die Kürzung der staatlichen Förderungen der Nuklearindustrie erzwangen eine Überarbeitung der Kraftwerkskonzepte. Kernkraftwerke müssen jetzt am Markt wettbewerbsfähig sein; die Konzeption wurde überdacht, um die Kapitalkosten zu senken (Generation III+). Fünfzig Jahre Erfahrung, Best-Practice und Ingenieurwissen von Leichtwasserreaktoren sollen in den Kraftwerksauslegungen der Generation III+ ihren Niederschlag finden. Angeregt durch ein großzügiges Förderangebot der Regierungen wurden in den USA in den letzten Monaten Pläne angekündigt, mehr als ein Dutzend Reaktoren der Generation III und der Generation III+ zu errichten.

Generation IV: International wird an der Konzeptentwicklung gearbeitet. Die Errichtung eines Demonstrationsreaktors der Generation IV ist nächster Zukunft in Südafrika geplant. Dabei handelt es sich um einen Kugelhaufenreaktor in Modulbauweise, den PBMR (pebble bed modular gas-cooled reactor).

Tabelle 3-1 zeigt die verschiedenen Kernkraftwerksreakortypen (mit Beispielen) und gibt an, zu welcher „Generation“ sie gehören.

Tab. 3-1 REAKTORTYPEN UND REAKTORGENERATIONEN

Generation	Kurzbeschreibung	Beispiel
I	Frühe Reaktorprototypen; meist vor oder während der Entwicklung von Sicherheitsstandards errichtet.	<ul style="list-style-type: none"> • frühe Siemens-SWR (Gundremmingen A) • SWR Siemens 69 (Isar 1) • WWER-440/230 (Novovoronesch 1, Bohunice V1, Kozloduj 1-4) • MAGNOX gasgekühlter Reaktor (Calder Hall, Chapelcross, Latina) • Früher RBMK-1000 (Leningrad 1 & 2) • UNGG (Frankreich, alle geschlossen)
II	Reaktoren; in der Regel nach formalen Sicherheitsstandards errichtet, einschließlich tiefengestaffelter Verteidigung (defense-in-depth) und Containment; nicht zur Beherrschung schwerer Unfälle ausgelegt.	<ul style="list-style-type: none"> • AGR (Hinckley Point B) • BWRs (Leibstadt, Olkiluoto, Gundremmingen B & C) • CANDU (Cernavoda) • Französischer N4 (Chooz & Civaux) • Deutsche Konvoi-Anlage (Emsland, Isar 2, Neckar 2) • Westinghouse DWR (Beznau, Krško, Asco) • WWER-440/213 (Bohunice V2, Dukovany, Paks) • WWER-1000/320 (Temelín, Kozloduj 5 & 6) • Jüngere RBMK-1000 (Tschernobyl 3 & 4) • RBMK-1500 (Ignalina 1 & 2) • Schnelle Brüter siehe Abschnitt 3.2.2.6
III	Fortgeschrittene Reaktoren mit verbesserter Sicherheit, ausdrücklich zur Beherrschung schwerer Unfälle konstruiert.	<ul style="list-style-type: none"> • Fortgeschrittene SWR (ABWR, SWR-1000, 4 Japanische ABWR Reaktoren) • Fortgeschrittener CANDU (ACR-700) • Fortgeschrittener DWR (AP600, EPR, WWER-1000/392)
III*	Generation III Reaktoren mit verbesserter Wirtschaftlichkeit.	<ul style="list-style-type: none"> • Fortgeschrittener CANDU (ACR-1000) • Fortgeschrittener DWR (AP1000) • Fortgeschrittener SWR (ESBWR)
IV	Fortgeschrittene Reaktoren mit verbesserter Wirtschaftlichkeit, erhöhter Sicherheit, erhöhtem Proliferationsschutz und reduzierter Abfallerzeugung.	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelle Reaktoren (GFR, LFR, MSR*, SFR, SCWR geschlossener Zyklus) • Thermische Reaktoren (MSR**, VHTR basierend auf dem PBMR oder GT-MHR, SCWR offener Zyklus)

MSR* mit Brennstoff in metallischen Hüllrohren
MSR** mit in Salz gelöstem Brennstoff

lebensministerium.at

Da der Großteil der zur Zeit betriebenen KKW zur Generation II gehört, dominieren deren Sicherheitsmerkmale die heutige nukleare Sicherheit. Kernkraftwerke der Generation III sind noch selten. Wenn sich der Anteil der Nuklearenergie an der gesamten Energieproduktion in Zukunft erhöhen sollte, so wird die nukleare Sicherheit längerfristig durch die Sicherheitsmerkmale der Generation III oder III+ und – noch wahrscheinlicher – der Generation IV bestimmt (vgl. Abschnitt 3.2.3).

3.2.2 Wichtige generische Schwachstellen hinsichtlich schwerer Unfälle aktuell betriebener Kernkraftwerke (Generationen I und II)

3.2.2.1 DWR & WWER

Bei DWR und WWER wird Leichtwasser unter Druck zur Kühlung und zur Neutronenmoderation eingesetzt. Mit der Ausnahme des WWER-440/230 und des WWER-440/213 verfügen DWR über Volldruckcontainments. Die WWER-440/230 und die 440/213 Blöcke wurden ursprünglich mit großen Niederdruck-Confinements, entweder mit Entlastungsventilen (230) oder mit Bubbler-Condensern als Druckabbau-System (213), hergestellt. Containments und Confinements stellen die letzte physische Barriere eines gestaffelten Barrierenkonzeptes („defense-in-depth“) zur Verhinderung von großen Freisetzungen von Radioaktivität in die Umwelt dar.

In erster Näherung können Druckwasserreaktoren verletzlich gegenüber Unfällen mit Umgehung des Sicherheitsbehälters (Containment-Bypass) bei Abriss eines Dampferzeugerrohrs, oder ge-

genüber Containment/Confinement-Versagen aufgrund von „interfacing LOCAs“, „direkter Containmentüberhitzung“ oder Wasserstoffverbrennung (besonders Wasserstoffexplosion) sein.

Viele DWR in Europa wurden mit Filtersystemen nachgerüstet, um ein Containment-Versagen bei schweren Unfällen zu verhindern und um den Quellterm bei schweren Unfällen zu reduzieren. Zusätzlich wurden viele DWR in Europa nachträglich mit „verbunkerten Sicherheitssystemen“ ausgestattet, um einige Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten, wenn die ursprünglich dafür vorgesehenen Sicherheitssysteme ausfallen sollten.

Containments und Confinements sind in der Regel nicht so ausgelegt, dass sie einem Bersten des Reaktordruckbehälters (RDB) standhalten könnten. Deshalb muss das Bersten des RDB – selber eine sehr wichtige innere Barriere des gestaffelten Barrierenkonzeptes – durch geeignete Vorsorgemaßnahmen, wie passendes RDB-Konzept und sorgfältige Materialauswahl und extensive vorbetriebliche und betriebliche Prüfungen, einschließlich Sprödbriechanalysen und Proben verhindert werden. Strahlungsbedingte Versprödung stellt bei Thermoschock unter Druck (PTS) eine ernste Gefährdung für viele Reaktoren dar (vgl. Abschnitt 3.7.1).

3.2.2.2 SWR

SWR sind Reaktoren bei denen das siedende Wasser vom Primärsystem Dampf produziert, der direkt zur Stromerzeugung auf die Turbine geleitet wird. Siedewasserreaktoren haben ein Voll-druckcontainment mit Druckabbausystemen, die bei Dampffreisetzungen innerhalb des Containments Druck abbauen.

Allgemein sind für Siedewasserreaktoren jene Containmentversagen gefährlich, die durch Wasserstoffverbrennung oder Überdruck entstehen, wenn die Wärmeabfuhr über eine längere Zeitdauer ausfällt. Schwere Unfälle können auch nach einem Reaktordruckbehälterversagen durch den direkten Kontakt von Trümmern des Reaktorkerns mit der Containmentwand entstehen, wodurch es zu einer frühen und großen Freisetzung von radioaktivem Material über das Reaktorgebäude in die Umwelt kommt (siehe auch 3.2.2.1 oben, Bersten des Reaktordruckbehälters). Der Großteil der SWR in Europa wurde mit gefilterter Druckentlastung oder zusätzlichen verbunkerten Sicherheitssystemen nachgerüstet.

3.2.2.3 RBMK

RBMK sind Siedewasserreaktoren, bei denen sich der Kern in vertikalen Druckröhren befindet und Graphit als Moderator verwendet wird. (Die PRIS- Datenbank der IAEO bezeichnet diese Reaktoren als LWGR, d.h. light water-cooled graphite-moderated.) Diese Reaktoren sind im Vergleich zu DWR und SWR groß dimensioniert. RBMK haben kein Containment im üblichen Sinne; einige der Blöcke verfügen über Druckabbausysteme, die sich unter dem Reaktorkernbereich befinden, und eine geringe Anzahl von gleichzeitigem Druckröhrenversagen (von insgesamt etwa 1600 Röhren) bewältigen können [IAEO 1999].

Die prinzipielle Schwäche der RBMK liegt (ungeachtet der Veränderungen, die in Folge des Tschernobyl-Unfalls durchgeführt wurden) darin, dass sich jeder Unfall mit einem größeren Kernschaden sehr wahrscheinlich zu einem Unfall mit einer großer Freisetzung weiterentwickelt, da kein Containment vorhanden ist und das Druckabbausystem (wo es eines gibt) nur über beschränkte Kapazitäten zur Verminderung der Druckröhrenversagen verfügt.

3.2.2.4 Schwerwasser-moderierte Druckwasserreaktoren

Der Schwerwasser-moderierte Druckwasserreaktor vom Typ CANDU® (Pressurized Heavy Water Reactor – PWHR) wird mit Schwerwasser (Deuterium) gekühlt und moderiert. Die Reaktoren verwenden Natururan als Brennstoff und dieser wird on-line, also bei Reaktorbetrieb, mit speziellen Maschinen beladen. Der CANDU-Reaktor in Cernavoda hat einen Spannbetonsicherheitsbehälter mit einem passiv anspringenden Sprühsystem zum Druckabbau.

Bei den CANDU Reaktoren entwickeln sich schwere Unfälle (im Vergleich zu den DWR) relativ langsam weiter, da die Brennstoffröhren von Moderatortanks (Calandria) umgeben sind. Prinzipiell schnellere Szenarien gibt es bei einem vollständigen Ausfall der Wärmeabfuhr oder bei Transienten ohne Reaktorschnellabschaltung, bei denen die positive Reaktivität des Kerns in Kernzerstörung und einem frühen Containmentversagen resultieren kann [IAEA 2002].

3.2.2.5 Gasgekühlte Reaktoren

MAGNOX – Reaktoren verwenden Natururanmetall als Brennstoff, Kohlendioxid zur Kühlung und Graphit als Moderator. Sechs MAGNOX-Kraftwerke wurden von 1988 und 2004 zur Dekommissionierung geschlossen. Für die übrigen vier MAGNOX-Reaktoren sind Abschaltzeiten in den Jahre zwischen 2006 und 2010 vorgesehen [HSE 2004].

Der AGR, der zweite gasgekühlte Reaktor, der in Europa betrieben wird, besteht aus einem Spannbeton-Reaktordruckbehälter (mit einer Stahlauskleidung) der den stahlumhüllten Brennstoff aus angereichertem Uran einschließt. Die Reaktoren sind graphit-moderiert und mit Hochdruck-Kohlendioxidgas gekühlt. Die Reaktoren werden online, d. h. während des Reaktorbetriebs, mit Brennstoff beladen.

Es gibt für MAGNOX und AGR Anlagen kaum detaillierte Information über Verhalten und Schwachstellen im Hinblick auf schwere Unfälle. Prinzipiell gilt für die Verwendung von Gas als Kühlmittel, dass es keine Phasenveränderung unter Unfallbedingungen gibt, wie das bei wassergekühlten Reaktoren der Fall ist. Zusätzlich bedeutet die große Graphitmasse im Kern (mehr als 1000 t) eine hohe thermische Trägheit und ein dementsprechend langsam ansteigendes Temperaturprofil unter Unfallbedingungen. Das Risiko eines schweren Unfalls besteht mutmaßlich bei Szenarien, bei denen durch Einwirkungen von außen ein so großes Loch gerissen wird, dass der Graphitmoderator zu brennen beginnt.

3.2.2.6 Schnelle Reaktoren

Es sind nur zwei Schnelle Brüter in Europa in Betrieb (Phénix, Frankreich und der BN-600 in der Russischen Föderation), wobei einer nur experimentell verwendet wird und die Stromproduktion nur als Nebenprodukt der Testprogramme anfällt.

Die Geschichte der Brüter ist bisher eine eher traurige, bei der nur einer von sieben dieser Reaktoren einen Zustand erreichte, der sich der wirtschaftlichen Rentabilität auch nur annäherte.

Die größten Schwachstellen im Hinblick auf schwere Unfälle ist bei Brütern der sogenannte „hypothetical core disruptive accident“ (HCDA), der in einer Zerstörung des Kerns bei einer Reaktivitätsexkursion mündet.

3.2.3 Allgemeine Betrachtungen zur Sicherheit der Kraftwerke der Generation III und IV (Fortgeschrittene Reaktoren)

Die wenigen Reaktoren der Generation III, die bereits in Betrieb sind, und die wenigen weiteren Anlagen die in Bau sind oder deren Errichtung im nächsten Jahrzehnt geplant ist, sind in Tabelle 3-1 aufgelistet. Ob Generation IV Anlagen je in nennenswerter Anzahl in Betrieb gehen werden, oder ob, im Gegenteil, die Generation III Anlagen „übersprungen“ werden und der künftige Zuwachs an Kernenergie von Generation IV Anlagen geliefert wird, ist umstritten.

Das Argument gegen die Generation III Variante ist, dass die mit vernünftigem Aufwand zugänglichen Ressourcen an spaltbarem U^{235} zum Betrieb der Reaktoren dieser Generation auf ein paar Jahrzehnte - je nach Annahmen - beschränkt ist (Zittel et al. 2006 oder Sholly, St. „Nuklear erzeugter Wasserstoff – eine nachhaltige Option?“ in dieser Publikation). Wenn Kernenergie bei der Überbrückung der Energielücke, die durch den Wegfall der fossilen Brennstoffe wahrscheinlich entstehen wird, eine signifikante Rolle spielen soll, dann müssten Isotope genutzt werden, die reichlich vorhanden sind. Dies setzt verschiedene, noch sehr hypothetische Reaktorkonzepte voraus, die auf der Nutzung von Pu^{239} oder U^{233} beruhen, die aus U^{238} und Th^{232} erbrütet werden. Praktisch alle Konzepte sind schnelle Plutonium Reaktoren bis auf einen thermischen Brütertyp mit Thoriumbrennstoff. Sehr optimistische Schätzungen gehen vom Einsatz der ersten Reaktoren zwischen 2015 und 2025 aus [DOE-1] (vgl. auch Weimann et al. „Zeitgerechtigkeit der Kernenergieoption“ in dieser Publikation).

Die Sicherheitsprobleme der Reaktoren der Generation IV unterscheiden sich stark von den Problemen, die aus den früheren Generationen bekannt sind. Allerdings ist es sehr schwierig deren Sicherheit heute einzuschätzen, da sie sich erst in der Konzeptphase befinden und es nur sehr wenige Studien über Sicherheitsaspekte gibt.

Bei der Diskussion um die Konzepte der Generationen III, III+ und IV stößt man oft auf den Ausdruck „inhärent sicher“. Bei „inhärent sicheren“ Reaktoren sollen alle Sicherheitsfunktionen (Reaktorabschaltung, Notkühlwassereinspritzung, Zerfallswärmeabfuhr, Containment-Kühlung) passiv gewährleistet sein, d.h. ohne aktive Systeme und ohne Eingriffe des Operators (letztere sollen erst nach langer Verzögerung, zwischen drei Tagen und einer Woche oder mehr nötig sein). Der Ausdruck „inhärent sicher“ bezieht sich nur auf Auslegungsstörfälle. Verglichen mit den Generation I und II Anlagen sind Generation III Anlagen besser gegen externe Gefahren ausgestattet (z.B. erhöhte Erdbebensicherheit, reduzierte Brand- und Überflutungsrisiken, besserer Schutz gegen Flugzeugabstürze). Ohne die Bedeutung dieses quantitativ erhöhten Sicherheitsniveaus zu unterschätzen, muss festgestellt werden, dass die neue Qualität „inhärenter Sicherheit“ im wahren Wortsinn noch immer nicht erreicht wird, selbst wenn man mutwillige Gefährdungsakte ausschließt.

Wie bereits erwähnt, befinden sich alle Konzepte der Generation IV (Tabelle 3-1) noch in der Planungsphase, sodass deren wirkliches Sicherheitsniveau schwer einzuschätzen ist. Schnelle Reaktoren haben jedenfalls eine Reihe von Nachteilen, die sie in der Errichtung teuer und im Betrieb schwierig machen. Einige dieser Probleme sind:

Geringe durchschnittliche Lebensdauer der schnellen Neutronen: Im Vergleich zu den thermischen Reaktoren ist es bei Schnellen Reaktoren schwierig die Kontrolle aufrechtzuerhalten

und eine „prompte Kritikalität“ zu verhindern, die sofort zu einem immensen Leistungsanstieg führt und dabei innerhalb von Sekunden große Teile des Reaktorkerns zerstören kann.

Ungünstige Eigenschaften des Kühlmittels im Primärkreislauf: Im Gegensatz zu Leichtwasserreaktoren sind die Kühlmittel der Schnellen Reaktoren im besten Falle neutral gegenüber Neutronen (Helium) meist jedoch Neutronengifte (Natrium, Blei). Daher senken schnelle Reaktoren bei einem LOCA-Unfall keineswegs die Reaktivität, sondern sie können die Reaktivität erhöhen (positiver Dampfblasenkoeffizient). Bei einer angenommenen Reaktivitätsexkursion bei einem möglichen Röhrenreakortyp des Schnellen Reaktors mit Natrium wurde eine 80 %ige Kernzerstörung innerhalb von 2 Sekunden berechnet [Tobita et al. 2006]. Dazu kommt, dass im Gegensatz zum Leichtwasserreaktor, der einmal zerstörte (geschmolzene) Kern seine Reaktivität bei Fehlen des Primärkreislaufkühlmittels nicht verliert, da Schnelle Reaktoren keinen Moderator benötigen. Der geschmolzene Kern bleibt wahrscheinlich kritisch und produziert weiterhin Energie.

Diese Beispiele demonstrieren die Unterschiede zwischen den Sicherheitsstandards, die für LWR und Schnelle Reaktoren erforderlich sind. Während die Reaktoren der Generation III+ jeden Unfall bis zu drei Tage lang ohne Eingriff des Operators bewältigen sollen, könnte bei einem Schnellen Reaktor schon wenige Sekunden nach Unfallbeginn der Kern zu 80 % geschmolzen und herausgeschleudert sein. Das scheint eine gewagte Verallgemeinerung zu sein, aber sie basiert auf zwei intrinsischen Prinzipien, die bei allen Schnellen Reaktorkonzepten der Generation IV zu finden sind: Zum Ersten schreitet die Leistungs – und Reaktivitätsexkursion viel schneller voran als bei thermischen Reaktoren sobald der Anteil der verzögerten Neutronen geringer wird. Zum Zweiten fehlt der günstige Effekt des Moderators, der den Reaktor automatisch subkritisch macht, sobald das Kühlmittel verdampft ist. Es wurden bisher keine ausführlichen Analysen jener auslösenden Ereignisse gemacht, die zu Reaktivitätsexkursionen führen, da nur sehr wenige Organisationen dazu die Werkzeuge haben. Aber es wäre keine Überraschung, wenn mehrere auslösende Ereignisse zu Reaktivitätsexkursionen wie der genannten führen könnten [Tobita et al. 2006].

Aktivierung des Primärkühlmittels ist ein Problem bei den metallgekühlten Schnellen Brutreaktoren. Die Halbwertszeit von Na^{22} ist mit 2,6 Jahren relativ lang, und es wird mit großen Aktivitäten gerechnet. Isotope mit kürzerer Halbwertszeit emittieren die Strahlung mit höherer Energie, sind ein Sicherheitsrisiko und sind ein Zeichen, dass beim Konzept des Kraftwerks mit besonderer Vorsicht vorzugehen ist [Guerrini et al. 1999]. Blei oder Blei-Wismuth-Eutektikum als Kühlmittel weisen ähnliche Aktivierungsketten auf.

Die Reaktion von Natrium mit Wasser und Luft ist ein weiteres für die Sicherheit bedeutendes Thema bei einem Schnellen Natriumgekühlten Reaktor (SNR) [Guerrini et al. 1999]. Wenn es hier zu einem sekundären oder tertiären Leck kommt, muss mit einem Brand gerechnet werden. Das könnte ein Hindernis für den Einsatz von Schnellen Reaktoren sein, vor allem weil eine hohe Aktivität des Primärkühlmittels angenommen werden muss. Evgenji Adamov, der sich sehr stark für den Einsatz von Schnellen Reaktoren einsetzt, sagte (zur Entwicklung der Schnellen Reaktoren in Russland) „...im Natriumkühlmittel haben wir etwa 50 Millionen Curie Radioaktivität, wir brauchen somit keine Brennstoffschmelze um einen Unfall wie in Tschernobyl zu haben, ein Brand reicht aus...“ [Adamov 1999].

Zum GFR (gascooled fast reactor) ist zu sagen, dass Helium eine geringe Wärmekapazität hat und daher ein LOCA bei diesem gasgekühlten Reaktor dazu führen kann, dass die Wärmeabfuhr aus dem Kern sofort ausfällt.

Aufgrund seiner Ähnlichkeiten zum „erprobten“ Konzept der Leichtwasserreaktoren wird der superkritische Reaktor manchmal als der sicherste Schnelle Reaktor der Generation IV bezeichnet.

Für alle Schnellen Reaktoren gilt, dass ihr Einsatz zu einer sogenannten Plutonium-Wirtschaft mit all ihren negativen Auswirkungen führt [Broda 1973].

Vom Standpunkt der Sicherheit wäre die auf Thorium gründende Alternative infolge der ungünstigen radiotoxischen Eigenschaften von U^{233} und begleitender Isotope ähnlich der Pu^{239} Alternative.

Während der thermische Leichtwasserreaktor eine erprobte Technologie darstellt, ist der Schnelle Reaktor größtenteils unbekanntes Land. Für den Leichtwasserreaktor gibt es mehr als 10.000 Jahre Betriebserfahrung. Das Konzept machte eine evolutionäre Entwicklung durch, die Reaktoren sind so ausgelegt, dass sie eine große Bandbreite von Unfällen bereits als Auslegungsunfall beherrschen, die Sicherheitssysteme werden so einfach wie möglich gehalten und sollen passiv eingreifen - damit werden Verlässlichkeit erhöht und Kosten reduziert. Es gibt ein ganzes Arsenal von rechnerbasierten Instrumenten, von denen jedes durch eine große Anzahl von gesonderten und von integrierten Tests validiert wurde. Die Anwender wissen was ihre Codes können und was sie nicht können. Es besteht dabei eine gewisse Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörden von der Industrie, da genügend Codes zur Verfügung stehen um behauptete Sicherheitsmargen berechnen und überprüfen zu können. Sogar unabhängige Institutionen wie Universitäten können die Behauptungen von Kraftwerksentwicklern über die angebliche Sicherheit von Kraftwerken überprüfen. Trotz dieser Vorteile besteht keine Einigkeit hinsichtlich der erreichten Sicherheitsniveaus.

Bei den schnellen Reaktoren ist die Situation vollkommen anders. Eine großzügige Berechnung² ergibt eine Betriebserfahrung von rund 120 Jahren. Die Erfahrung mit den existierenden Reaktoren gibt nicht viel Hoffnung auf einen reibungslosen Einsatz von Schnellen Reaktoren. Die eingesetzten Materialien sind andere und auch die Sicherheitskonzepte werden andere sein. Darüber hinaus ist der Betrieb der Schnellen Reaktoren aufgrund der genannten immanenten Mechanismen schwierig. Vom Gesamtbudget für die Entwicklung der Reaktoren der Generation IV ist nur ein geringer Teil der Sicherheitsforschung gewidmet. Man kann nicht davon ausgehen, dass dasselbe Wissen und dasselbe Bewusstsein für Sicherheitsfragen zum Zeitpunkt des geplanten Einsatzes der Schnellen Reaktoren vorhanden sein wird wie bei den Leichtwasserreaktoren heute. Es gibt nur sehr wenige Codes für die Berechnung der Auswirkungen von auslösenden Ereignissen bei Schnellen Reaktoren und noch keine extensiven Validierungsmatrizen für diese Codes. Weil die Verknappung der Rohstoffe für Leichtwasserreaktoren Druck in Richtung auf einen frühen Einsatz von Schnellen Reaktoren ausüben könnte, wäre eine enorme finanzielle Anstrengung notwendig um die Standards für die Werkzeuge zur Sicherheitsanalyse auf das Niveau derer für LWR zu heben; es gibt jedoch keine Anzeichen, dass dies geschehen wird.

Die oben angeführten Schwierigkeiten stehen in krassem Widerspruch zu den erklärten Zielen der Generation IV Reaktoren: „inhärent sicher“, proliferationsresistent, ökonomisch und frei von langlebigen hochradioaktiven Abfällen. An der Erreichbarkeit dieser Ziele werden beträchtliche

² Auf der Basis von Betriebsdaten aus PRIS und der Nuclear News World List of Nuclear Power Plants March 2001, mit Zusatzinformationen von allgemeineren Quellen.

Zweifel geäußert: „Wir haben nicht gefunden, und halten es - auf der Basis heutigen Wissens - für nicht realistisch zu erwarten, dass es neue Reaktor- und Brennstoffzyklentechnologien gibt, die zugleich die Probleme der Kosten, der Sicherheit, des Abfalls und der Proliferation lösen.“ [MIT 2003].

3.2.4 Zwischenbilanz

Dieser Überblick über die häufigsten Reaktor Typen aller Generationen zeigt auf, dass sie alle generische Schwachstellen gegenüber schweren Unfällen haben, die zu großen Freisetzungen von Radioaktivität in die Umwelt führen können. Dies, trotz aller Bemühungen solche Schwachstellen zu eliminieren und trotz aller Fortschritte, die zweifellos erzielt wurden.

3.3 Gefahren

3.3.1 Anlageninterne Ereignisse

Einige Typen von Ereignissen und Versagen in Kernkraftwerken laufen unter der großen Überschrift „anlageninterne Ereignisse“. Viele Arten von anlageninternen Ereignissen sind einer Reihe von Reaktortypen gemein, während andere mehr oder weniger spezifisch bei einem bestimmten Konzept auftreten. Einige der anlageninternen Ereignisse sind ihrer Art nach Ausfälle von technischen Systemen. Beispiele für Unfallauslöser, die zu Situationen führen, bei denen die Sicherheitssysteme gefordert sind, sind Ausfall des Speisewassers, verschiedene Größen von Rohrbrüchen (führt zu einem Kühlmittelverlust-Unfall oder LOCA), Ausfall der externen Stromversorgung und Ausfall des Technisch-Wassers.

Zu den typischen Arten von anlageninternen Ereignissen, die in Probabilistischen Sicherheitsanalysen untersucht werden (s. Abschnitt 3.5) gehören:

- Kühlmittelverlust (LOCA – Loss of coolant accident) mit Ausfall der Kernnotkühlsysteme (ECCS) oder der Nachwärmeabfuhrsysteme.
- Transienten mit Speisewasserverlust oder Verlust des Nachwärmeabfuhrsystems (einschließlich Verlusts des ständig verfügbaren Technisch-Wassers).
- Verlust der Fremdstromeinspeisung mit Versagen der Notdieselgeneratoren (resultiert in einem „station blackout“, dem kompletten Ausfall der Stromversorgung des KKW).
- Transientenereignisse, die von einem Versagen der automatischen Reaktorabschaltung begleitet sind, der sogenannte unkontrollierte Leistungsanstieg ohne Schnellabschaltung (ATWS).
- Interne Flutung des Kraftwerks, verursacht durch den Abriss eines Kühlwasserrohres (von einem System wie etwa des ständig verfügbaren Technisch-Wassers oder dem Hauptkühlwassersystem), oder Auslösung eines Wasser basierten Feuerlöschsystems.

Viele der schwerwiegendsten Systemversagen bei der Reaktion auf ein anlageninternes auslösendes Ereignis beruhen auf einzelnen Faktoren, die mehrere Stränge desselben Systems betreffen – ein sogenanntes „common cause“ Versagen. Ein Beispiel für ein solches Versagen wäre

ein Wartungsteam, das alle drei Pumpen eines Systems schmiert und systematisch das falsche Schmiermittel in die Lager der Pumpen einbringt. Wenn das Pumpsystem dann gebraucht wird, fressen sich die Lager fest und alle drei Stränge versagen auf Grund derselben Ursache.

Auch die Eingriffe der Operatoren bei der Reaktion auf ein auslösendes Ereignis können einen Systemausfall verursachen. So führte z. B. die vorzeitige Beendigung der Hochdruckeinspritzung durch die Operatoren während des Unfalls in Three Mile Island Block 2 zu einem Kernschaden. Seit dem Unfall in Three Mile Island haben die Kernkraftwerke auf der ganzen Welt von Ereignis-orientierten Betriebsvorschriften für den Notfall (emergency operation procedures = EOP) auf Symptom-orientierte EOP umgestellt. Diese letztere Art der EOP erfordert vom Operator keine Unfalldiagnose während der stressbeladenen Zeit in der auf den Unfall reagiert werden soll. Stattdessen sollen die Operatoren die Unfallsymptome behandeln. Davon verspricht man sich, dass die Wahrscheinlichkeit von Fehlern der Operatoren, die zu Systemversagen führen, reduziert wird. Andererseits gibt es zumindest einen Fall, bei dem ein schwerer Unfall verhindert wurde weil die Operatoren versäumten aktiv einzugreifen³.

Eine systemdurchdringende und potentiell schwerwiegendere Art der Interaktion, die Risiken interner Ereignisse hervorrufen oder verschlimmern kann, sind Schwachstellen bei der sogenannten „Sicherheitskultur“ eines Kernkraftwerks. Sicherheitskultur ist definiert als *„jene Gesamtheit von Charakteristika und Einstellungen von Organisationen und Einzelnen, die als übergeordnetes Ziel festlegt, dass die Sicherheitsfragen eines Kernkraftwerks die ihnen aufgrund ihrer Wichtigkeit zustehende Aufmerksamkeit bekommen“* [INSAG 1991]. Es besteht weitgehende Einigkeit darin, dass Fragen der Sicherheitskultur beim Unfall im Reaktor 4 von Tschernobyl eine bedeutende Rolle gespielt haben. Ein anderes Beispiel für ein Problem mit der Sicherheitskultur ist das KKW Peach Bottom in den USA, 1987, wo diensthabende Operatoren bei der Arbeit schlafend getroffen wurden [NRC 1987]. Die amerikanische Aufsichtsbehörde NRC ließ das KKW schließen und verhängte eine Strafzahlung von über einer Million Dollar (damals die größte je verhängte zivilrechtliche Strafzahlung). Das Kernkraftwerk blieb zwei Jahre außer Betrieb.

3.3.2 Gefährdung durch externe Ereignisse

Externe Ereignisse sind die Gefährdungen, die nicht durch das Konzept der Kraftwerksanlagen entstehen⁴. Gefährdungen aus externen Ereignissen entstehen entweder durch Risiken aus Naturphänomenen oder aus menschengemachten Phänomenen; sie sind zahlreich und sehr unterschiedlich (Tabelle 3-2). Im Allgemeinen liegt das Risiko der externen Ereignisse darin, dass die gleiche Ursache den Ausfall mehrerer Systeme auslösen können (Common cause failures).

Externe Gefahren, die an einem bestimmten Standort auftreten, sollten bei der Kraftwerksauslegung berücksichtigt und während des Genehmigungsprozesses behandelt werden. Allerdings können externe Gefahren sich in der Realität oder in der Beurteilung während der Betriebszeit des KKW verändern. Beispiele dafür sind Veränderungen bei Ausmaß und Häufigkeit von Überschwemmungen aufgrund des Klimawandels, wie sie in jüngster Zeit immer häufiger vorkommen. Weitere Beispiele sind neue Bewertungen des seismischen Risikos aufgrund verbesserter Unter-

³ Hätten die Operatoren beim Brand in Browns Ferry 1974 tatsächlich, wie vorgesehen, nach der Reaktorschnellabschaltung die Kontrollstäbe wieder in die Ausgangsstellung zurückgefahren, dann hätte das Hydrauliksystem des Kontrollstabantriebs – das einzige System das Wasser heranführte und so den Kern bedeckt hielt – die Fließrate halbiert und der Kern wäre – weil nicht ausreichend mit Wasser bedeckt - beschädigt worden.

⁴ Obwohl Brände, die im Kraftwerk entstehen, als „internes“ Ereignis angesehen werden könnten, werden sie generell als externes Ereignis behandelt.

suchungsmethoden, die Entwicklung immer größerer, schwererer und schnellerer ziviler Flugzeuge. Dies sollte zu einer Neubewertung der Sicherheit von KKW gegenüber externen Risiken führen. Die angeführten Beispiele werden später noch detaillierter erläutert.

Tab. 3-2 EXTERNE GEFÄHRDUNGEN

Externe Gefährdungen, die bei der Auslegung, der Genehmigung und dem Betrieb von Kernkraftwerken berücksichtigt werden müssen

Natürliche Gefahren	Anthropogene Gefahren	Gezielte Gefährdungen
Abweichung der Erdachsenrotation	Baustrukturen-Einsturz	Computer – Schwachstellen
Asteroideneinschlag	Bodenkontaminierung	(Viren, Hacker, Y2K)
Biodiversitätsveränderungen	Brand	Fallout von weit entfernt explodierten Atomwaffen
Blitzeinschlag	Brückeneinsturz	Krieg (Konventionell)
Dürre	Chemische Freisetzungen	Artillerie und Panzer
El Niño	Erdölteppich	Fernlenkgeschosse und Raketen
Epidemie	Explosion	Flugzeugangriff Infanterieangriff
Virale	Flugzeugabsturz	Landminen
Bakterielle	Geomagnetische Stürme	Krieg (Massenvernichtungswaffen)
Erdbeben	Kernkraftwerksunfall	Atomwaffen
Erdrutsch	Kernwaffenunfall	Biologische Waffen
Extrem hohe Temperaturen	Kritikalität in einer Nuklearanlage	Bakteriologische und
Extrem niedrige Temperaturen	Luftverschmutzung	Virale Erreger
Geomagnetische Stürme	Militärwaffen (Unfall mit)	Chemische Waffen
Graupel	Ozonabbau	Elektromagnetischer Impuls
Hagel	Pipelineversagen	Kriminaltaten
Hangabrutschungen	Raffinerie-Unfall	Mord
Höhleinsturz	Raumfahrzeug Wiedereintritt (un-kontrollierter)	Terrorismus
Hunger	Seilbahnabsturz	Angriff militärischer Art
Hurrikan	Staudammversagen	Attentat
Klimawandel	Stromausfall	Autobombe
Kometeneinschlag	Tunnel-Unfälle:	Briefbombe
Lauffeuer	Brand	Flugzeugentführung
Lawine	Flutung	Geiselnahme
Meeresspiegelanstieg	Einsturz	Heckenschützen
Meteoriteneinschlag	Verkehrsstreik	Kontamination des Trinkwassers
Permafrostauftauen	Verkehrsunfall	Kontamination von Lebensmitteln,
Sandsturm	Versagen oder Streik des	Medikamenten, etc.
Schluckloch	Luftverkehrskontrollsystems	Massenvernichtungswaffen
Schnee	Versinken von Boot oder Schiff	Biologische Waffen
Seiche	Wasserverschmutzung	Chemische Waffen
Senkung	Zugkollision oder Entgleisung	Kernwaffen
Sonnenfleckenaktivität		Unruhen
Staubsturm		
Tornado		
Tsunami		
Überschwemmung		
Vulkanaktivität		
Waldbrand		


lebensministerium.at

3.3.2.1 Externe Naturgefahren

Es gibt eine Reihe von Naturgefahren (vgl. Tabelle 3-2), die eine Ereignisabfolge auslösen können, die in einem Unfall im Kernkraftwerk endet. In vielen Fällen werden externe Ereignisse

(einschließlich Naturgefahren) bei der Durchführung von Probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) berücksichtigt.

3.3.2.2 Externe anthropogene Gefahren

Ebenso wie Naturgefahren können auch anthropogene Gefahren (vgl. Tabelle 3-2) ein Risiko für einen Kernkraftwerkunfall darstellen. Viele von diesen sind sehr standortspezifisch, z.B. als Folge nahegelegener gefährlicher Anlagen, und sie können sich im Laufe der Zeit verändern wenn sich die Infrastruktur oder die Umwelt um das Kraftwerk ändern.

3.3.3 Feindliche Handlungen

Eine weitere Kategorie für das Auslösen von Unfällen in Kernkraftwerken stellt die große Gruppe der „Feindlichen Handlungen“ dar. Die internen und externen auslösenden Ereignisse, die oben diskutiert wurden, sind zufällige Ereignisse, die mit einer mehr oder weniger vorhersehbaren Häufigkeit eintreten. Feindliche Handlungen unterscheiden sich in diesem Punkt – es sind absichtliche Handlungen, die sich gegen nukleare Anlagen richten, um direkte oder wirtschaftliche (z.B. indem eine verlängerte Schließung verursacht wird) Schäden, Energieengpässe, oder Freisetzungen von Radioaktivität in die Umwelt zu verursachen.

Vier Kategorien von feindlichen Handlungen können unterschieden werden –in der Reihenfolge aufsteigender Bedrohung: Vandalismus, Sabotage, Terrorismus und Kriegshandlungen.

Die Geschichte der Kernenergieprogramme hat eine Reihe von Beispielen von Vandalenakten gegen Kernkraftwerke gesehen. Die meisten Länder informieren die Öffentlichkeit darüber nicht. Die USA haben eine Safeguards Summary Event List (SSEL) publiziert, die diese Ereignisse detailliert (wenn auch nicht völlig uneingeschränkt) auflistet, möglicherweise nur bis zum Jahr 2000.

Solche Handlungen bewegen sich zwischen harmlos bis zu unerwartet gefährlich. Immer schwingt bei Vandalismus die Gefahr mit, dass eine Handlung gesetzt wird, bei der der Täter nicht klar erkennt, dass er damit eventuell einen Ereignisablauf auslöst, der in einen Unfall münden kann.

Sabotageakte werden in der Regel von zwei Tätertypen durchgeführt. Die erste Gruppe bilden Personen, die autorisierten Zugang zu Nuklearanlagen haben. Die zweite Gruppe sind Täter, die die Sicherheitsvorkehrungen der KKW überwinden um es zu beschädigen. Absichtlich oder unabsichtlich - diese Handlungen, die mit der Absicht gesetzt werden, um das KKW zu beschädigen, können unter gewissen Umständen eine Ereignisabfolge losstreten, die in einen Unfall mündet.

Ohne zu sehr ins Detail zu gehen sei auf Berichte verwiesen, dass bei Kernkraftwerken: (a) Ventile geschlossen wurden um Sicherheitssysteme nicht anspringen zu lassen; (b) Fremdsbstanzen in Anlagen des Kraftwerks gegeben wurden, offensichtlich um ein Komponenten- oder Systemversagen hervorzurufen, sobald sich die Anlage als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis einschaltet; und (c) Treibstoffvorräte für Notfallhilfseinrichtungen manipuliert wurden, offenbar um bei einem Ereignis mit Verlust der externen Stromversorgung ein Versagen hervorzurufen. Diese Sabotageversuche wurden offensichtlich von Personen mit autorisiertem Zugang zu der Anlage unternommen – Handlungen, die man als „Sabotage von innen“ bezeichnet. Es gibt mindestens einen dokumentierten Fall, bei dem offensichtlich versucht wurde einen Ausfall der externen Stromversorgung eines KKW herbeizuführen; dies ist ein Beispiel für Sabotage von außen.

Seit den Terrorangriffen auf die USA im September 2001 und den später in der ganzen Welt verübten Terrorangriffen besteht offenbar die Sorge, dass Terrorangriffe auch gegen Nuklearanlagen gerichtet werden könnten. Der Möglichkeit, dass Flugzeuge entführt und gezielt in Kernkraftwerke geflogen werden könnten, wird seit den Angriffen auf das ehemalige World Trade Center in New York und das Pentagon viel Aufmerksamkeit gewidmet, ebenso wie dem Potential für Terrorangriffe auf Nuklearanlagen allgemein [EPRI 2002; POST 2004; SKI 2003]. Das deutsche Umweltministerium (BMU) gab bei der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) eine Studie über Flugzeugabstürze auf Kernkraftwerke in Auftrag (die Studie unterliegt formell der Geheimhaltung, wurde aber dennoch in den Medien breit diskutiert). Allerdings gibt es kaum Hinweise darauf, dass die größten zivilen Flugzeuge, die in Betrieb sind oder kurz davor stehen, bei diesen Erwägungen berücksichtigt wurden. Zur Orientierung: Das größte von ihnen, der Airbus A380, hat im Vergleich zu den im September 2001 verwendeten Flugzeugen die etwa 4-fache Masse⁵ bei Abflug.

Es gibt Beispiele im historischen Archiv für Bombenangriffe auf einen Bauplatz für ein Kernkraftwerk (Busher im Iran wurde während des Iran-Irak Krieges mehrfach bombardiert). Während der verschiedenen Konflikte beim Zusammenbruch Jugoslawiens flogen Militärflugzeuge über das KKW Krško in Slowenien. (Nuklearanlagen, jedoch keine KKW, wurden mit Militärschlägen durch die USA und Israel zerstört.) Weitere Beispiele sind im Beitrag von Hirsch, H. „Terror und Kriegsgefahr“ in dieser Publikation zu finden.

Kernkraftwerke sind nicht so ausgelegt, dass sie gegen militärische Angriffe geschützt wären. Theoretisch soll das Militär jenes Staates, in dem sich das Kraftwerk befindet, Schutz gegen solche Gefahren gewähren. Die Atomgesetze der USA verbieten sogar die Berücksichtigung von militärischen Angriffen im Genehmigungsverfahren für Kernkraftwerke.

Die Folgen militärischer oder terroristischer Angriffe auf Kernkraftwerke können große Freisetzen von Radioaktivität in die Umwelt sein.

⁵ <http://www.airbus.com>

3.4 Unfälle in Kernkraftwerken und „Beinahe-Unfälle“

3.4.1 Schwere Unfälle in Kernkraftwerken

Es gab zwei schwere Unfälle in Kernkraftwerken. Im Reaktor von Block 2 des KKW Three Mile Island (DWR, gebaut von Babcock & Wilcox, jetzt im Eigentum von Framatome ANP) in den USA kam es im März 1979 zu einer teilweisen Kernschmelze. Ursache war Kühlmittelverlust, da ein Entlastungsventil offen blieb und zusätzlich das Abschalten des Kernnotkühlsystems durch Operator-Eingriff. Trotz Schmelzen eines Teiles des Kernes blieben durch spätes Wiedereinsetzen der Kühlung Reaktordruckbehälter und Containment intakt, wodurch größere Freisetzungen von Radioaktivität an die Umwelt verhindert wurden.

Im April 1986 wurde der Reaktor in Block 4 des KKW in Tschernobyl (ein RBMK) durch eine Reaktivitätsexplosion zerstört [Steinberg et al. 1991]. Die Folgen waren die Freisetzung großer Mengen radioaktiver Substanzen in die Umwelt und die Evakuierung und anschließend permanente Aussiedelung aller Einwohner aus einer 30-km Zone rund um das Kraftwerk. Der letzte der vier Reaktoren in Tschernobyl (Block 3) wurde im Dezember 2000 geschlossen.

3.4.2 Chronologie der jüngeren Ereignisse

Einige Arten von Ereignissen sind, auch wenn sie nicht direkt in einem Unfall enden, so nah daran, dass sie als Vorläuferereignisse eines schweren Unfalles betrachtet werden. Volkstümlicher werden derartige Ereignisse, insbesondere wenn die bedingte Wahrscheinlichkeit für Schaden am Kern groß war, als „near-miss“ oder „Beinahe-Unfall“ bezeichnet. Eine Chronologie ausgewählter Ereignisse findet sich in Tabelle 3-3.

Tab. 3-3 CHRONOLOGIE VON EREIGNISSEN, "NEAR MISSES" UND DEUTLICHE ANZEICHEN VON MANGELHAFTER SICHERHEITSKULTUR

Jahr	KKW/Land	Unfall/Ereignis/...	INES
1958	Calder Hall / UK	Turbinenversagen	NE (=Nicht enthalten)
1974	Shippinport / USA	Turbinenversagen	
1975	Browns Ferry / USA	Brand	NE
1979	Barsebäck / SWE	Turbinenversagen	NE
1980	Yankee Rowe / USA	Turbinenversagen	NE
1982	Metzamor / Armenia	Brand	NE
1983	Salem / USA	unkontrollierter Leistungsanstieg ohne Schnellabschaltung (ATWS)	NE
1985	Maanshan / Taiwan	Turbinenversagen	NE
1989	Vandellos I / Spain	Turbinenversagen / Brand	3
1989	Ignalina II / LIT	Brand	NE
1991	Salem Unit 2 / USA	Turbinenversagen	NE
1991	Tschernobyl II / UKR	Turbinenversagen / Brand	2
1993	Narora / India	Turbinenversagen / Brand	NE
1995	Leibstadt / CH	Wasserstoffverpuffung in einem Hilfsdampferzeuger	NE
1999	Blayais / FRA	Flutung/Verlust der Netzversorgung	2
1999	Sellafield / UK	Datenverfälschung	NE
2001	Sizewell-B / UK	Leck an der Reaktordruckbehälterdichtung	NE
2001	Cattenom-3 / FRA	Brandschaden	NE
2001	Hamaoka / Japan	2F-Bruch der Frischdampfleitung	NE
2001	Philippsburg / GER	Fehlerhafte Borsäurekonzentration	2
2001/2	Brunsbüttel / GER	Rohrleitungsversagen	1
2002	Davis-Besse / USA	Korrosion am Reaktordruckbehälterdeckel	3
2002	TEPCO / Japan	Datenverfälschung	1
2003	Paks 3 / HUN	schwere Beschädigung von Brennelementen bei der Reinigung (außerhalb des Kerns)	3
2003	Kozloduy 3 / BG	Kühlmittelverlustunfall (LOCA)	1
2004	Vandellos 2 / SPA	Technischwasserrohrbruch & Verlust von Wandstärke durch Korrosion	2
2004	Temelin / CZ	Überlauf kontaminierten Kühlmediums	
2004	Sellafield THORP/ UK	Leckagen in Wärmetauscherröhren	NE
2005	Sellafield THORP/UK	Rohrversagen in feed clarification cell	NE
2006	Kozloduy 5 / BG	ATWS / Versagen der mechan. Reaktorschnellabschaltung	2
2006	Forsmark-1 /SWE	Versagen zweier Dieselnstromaggregate bei Netzabschaltung	2
2006	Forsmark-2 / SWE	INES-Bewertung aufgrund eines früheren Ereignisses in Forsmark 1	2

In den letzten Jahren kam es zu einer Reihe von schwerwiegenden Ereignissen, wie etwa dem Leck am Reaktordruckbehälterverschluss in Sizewell-B (UK), fehlerhafter Borsäurekonzentration in Philippsburg (Deutschland), bisher nie da gewesene Brennstoffbeschädigung in Cattenom-3 (Frankreich), ein Rohrbruch im Sprühsystem des Reaktordeckels in Brunsbüttel (Deutschland), Korrosion des Reaktordruckbehälterdeckels in Davis-Besse (US), starke Brennstoffbeschädigung (von Brennstäben aus dem ehemaligen Kern) bei der Reinigung im Block 3 des KKW Paks

(Ungarn), Datenfälschung in Sellafield (UK) und TEPCO (Japan) und Bruch einer Primärleitung in Kozloduj (Bulgarien).

Ereignisse, wie die obigen, selbst wenn kein Austritt von Radioaktivität in die Umwelt stattfindet, können in Folge von Schäden an der Anlage, Produktionsstillständen und Strafzahlungen beträchtliche finanzielle Auswirkungen haben. Die Kosten der Schäden in Philippsburg, Paks und Davis-Besse alleine, inklusive Ersatzstrom, haben bis Oktober 2003 über 570 Millionen Euro betragen. Neben der finanziellen Katastrophe zeigt sich nicht selten bei den folgenden Untersuchungen, dass es auch um die Sicherheitsorganisation der Betreiber schlecht bestellt ist.

In Forsmark in Schweden kam es zu einem der jüngsten Ereignisse, bei dem von 4 Notfalldieselmotoren nur zwei ansprangen. Danach wurden Forsmark und 4 weitere Reaktoren vorübergehend geschlossen. Bis Ende 2006 lag noch keine schlüssige Erklärung dafür vor, warum zwei Generatoren angesprungen sind und zwei nicht. Das Ereignis zeigte, dass Redundanz, die für ausreichend angesehen wurde, keineswegs zufrieden stellend ist. Das zeigt, dass die berechneten Wahrscheinlichkeiten für Versagen, wie sie etwa in der PSA bestimmt werden, offenbar nicht das ganze Bild zeigen und Überraschungen nie ausgeschlossen werden können. Die Untersuchungen im Anschluss an das Ereignis brachten Defizite in der Sicherheitskultur im KKW Forsmark zu Tage, die der Aufsichtsbehörde so schwerwiegend erschienen, dass gerichtliche Schritte eingeleitet wurden.

3.4.3 Gemachte und noch nicht gemachte Hausaufgaben

Vor dem Unfall in Three Mile Island Block 2 im Jahre 1979 war der Schätzwert für die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls in einem Reaktor seitens der Nuklearexperten typischerweise in der Größenordnung von einmal in einer Million Jahren ($10^{-6}/a$), ungeachtet der Tatsache, dass die Pionier-PSA [WASH-1400] damals eine wesentlich höhere Wahrscheinlichkeit als Resultat ergab (einmal in 17.000 Jahren oder etwa $6 \times 10^{-5}/a$).

Der Eintritt des Unfalls in Three Mile Island nach weniger als 1000 Reaktorjahren Betriebserfahrung mit Kernkraftwerken war ein Weckruf für die Nuklearindustrie. Im darauf folgenden Jahrzehnt wurden zahlreiche Verbesserungen beim Faktor Mensch im KKW Betrieb, bei den Vorschriften, und beim Training gemacht. Zu einem geringeren Teil wurden auch Veränderungen im Kraftwerkskonzept durchgeführt.

Für Europa wiederum war es der Unfall in Tschernobyl 1986 der eine durchgreifende Überprüfung der Nuklearen Sicherheit einleitete und bei Vielen die Erkenntnis brachte, dass das dicht besiedelte Europa sich eine große Radioaktivitätsfreisetzung nicht leisten könne. So wurden beachtliche Sicherheitsverbesserungen in der Zeit nach Three Mile Island 2 und Tschernobyl 4 bei europäischen Kernkraftwerken durchgeführt.

Es kam zu einer intensiveren Nutzung von Betriebserfahrungsanalysen und -rückmeldungen, auch unterstützt von der World Association of Nuclear Operators (WANO), der IAEO und anderen. Zusätzlich haben WANO und die IAEO eine Reihe verschiedenartiger „peer reviews“ durchgeführt (z.B. zu Konzept, Betrieb, Atommüllmanagement, Aufsichtsbehörden, Sicherheitskultur, Unfallmanagement, Strahlenschutz, etc.).

Aber seither haben eine Reihe von Anlassfällen wieder Mängel in der Dokumentation, Systemkonzepten und Sicherheitskultur aufgezeigt. Sogar führende Personen in der Nuklearindustrie sind zu dem Schluss gekommen, dass Selbstgefälligkeit, übergroßes Vertrauen, Selbstzufriedenheit und Nachlässigkeit, die sich in einigen Anlassfällen zeigten, die gesamte Nuklearindustrie bedrohten.

Ein Unfall oder ein schwerwiegendes Sicherheitsereignis würden die Nuklearindustrie schwer beschädigen, sagte der Generaldirektor der IAEA, Mohammed El Baradei in einer Videopräsentation beim Meeting der American Nuclear Society in New Orleans im November 2003. *„Wir können uns einen weiteren Unfall nicht leisten“* fügte er hinzu. El Baradei sagte, dass es im Bereich der Sicherheit noch viel zu tun gäbe, vor allem bei der einheitlichen Anwendung von Sicherheitsstandards und Sicherheitskultur in der gesamten Industrie.

Bei dem alle zwei Jahre stattfindenden Treffen der WANO am 13. und 14. Oktober 2003 in Berlin wurden Vertreter der Energieversorger gewarnt, dass die Nuklearindustrie weltweit in Gefahr sei, bedroht durch Nachlässigkeit und Selbstzufriedenheit, die allein in den letzten Jahren zu mehreren „schwerwiegenden Ereignissen“ in Kernkraftwerken in Europa, den USA und Japan geführt hat. Diese Warnungen wurden von leitenden WANO-Beamten vorgetragen, doch wurde die Botschaft noch deutlicher von Vertretern jener Organisationen vorgetragen, die frühere Zeichen nicht beachtet hatten, und in vielen Fällen immer noch unter den finanziellen, sozialen und politischen Folgen leiden.

Der WANO-Vorsitzende Hajimu Maeda warnte, dass *„eine furchtbare Krankheit“* die Kernkraftwerksbetreibenden Organisationen von innen bedrohe. Es beginnt wie er sagte mit *„Verlust der Motivation von anderen zu lernen...überhöhtem Selbstvertrauen... (und)Nachlässigkeit bei der Pflege der Sicherheitskultur angesichts des starken Drucks des liberalisierten Energiemarkts die Kosten zu reduzieren.“* Wenn diese Probleme ignoriert werden, dann sind sie *„wie eine furchtbare Krankheit, die innerhalb der Organisation entsteht“* und wenn sie nicht entdeckt wird, zu einem *„großen Unfall“* führen könne, der *„die gesamte Organisation vernichten wird. Wir müssen den Fallen der Selbstzufriedenheit ausweichen, die uns zu zerstören drohen.“*

„Selbst ein kleinerer Unfall könnte eine Katastrophe sein“ hallte es von Bruno Lescoeur, dem geschäftsführenden Vize-Präsidenten für Produktion und Handel bei *Électricité de France* wider, *„da er die Akzeptanz für die Kernenergie in Frankreich, vielleicht in der ganzen Welt in Frage stellen würde.“*

Armen Abagyan von Rosenergoatom sagte zur gleichen Zeit, dass die geringe Aufmerksamkeit, die den Betriebsereignissen geschenkt würde – er nannte Ereignisse in Russland, Frankreich und den USA – *„zu einem neuen Ausbruch von antinuklearer Opposition führen und sich sowohl auf die russische als auch die Nuklearindustrie in der ganzen Welt negativ auswirken könne.“*

Die Serie der Ereignisse, die auftraten, und der Defizite in der Sicherheitskultur, die sichtbar wurden nachdem diese Warnungen ausgesprochen wurden, zeigt, dass sie nicht oder nicht ausreichend beachtet wurden. In der Tat sagte Brychanov, Direktor des Kernkraftwerkes Tschernobyl zum Zeitpunkt des Unfalles, in einem Interview im Jahre 2006, anlässlich des 20. Jahrestages des Unfalles: *„Tschernobyl hat niemanden irgendetwas gelehrt“.*

3.5 **PSA, deren Ergebnisse und Implikationen**

PSA (Probabilistische Sicherheitsanalysen) werden heutzutage fast universell zur Identifikation jener Ereignisabfolgen verwendet, die am stärksten zur Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls und, bei Level 2 Analysen, zur Wahrscheinlichkeit großer Radioaktivitätsfreisetzungen in die Umwelt beitragen. Zwei Maßzahlen von Interesse sind die Kernschadenshäufigkeit (CDF – core damage frequency) und die Häufigkeit für große Freisetzungen (LRF – large release frequency). Die CDF bietet einen Anhaltspunkt dafür, wie erfolgreich die Auslegung Unfälle vermeiden kann. Die LRF bietet einen Anhaltspunkt dafür wie gut eine Kraftwerksauslegung dennoch eintretende Unfälle in ihren Auswirkungen mildern kann.

Eine PSA auf dem Stand-der-Technik des Jahres 2006 umfasst die folgenden Aspekte:

- Analyse der internen Ereignisse im Leistungsbetrieb und bei abgeschaltetem Reaktor (einschließlich Brennstoffbeladung und anderen Aktivitäten bei Revisionsstillstand).
- Analyse der externen Ereignisse im Leistungsbetrieb und bei Reaktorstillstand, einschließlich Naturereignisse und anthropogene Gefahren.
- Vollständige Analyse im Sinne einer besten Schätzung der strukturellen Leistungsfähigkeit des Containments und der Auswirkungen von sich entwickelnden Unfällen auf die Containmentintegrität (Level 2 PSA).
- Unsicherheits – und Sensitivitätsanalyse.

Moderne PSA werden als „lebende PSA“ betrieben, d.h. dass Änderungen am Konzept, der Ausführung und den Abläufen und die wachsende Erfahrung mit der Anlage regelmäßig in den PSAs nachgeführt werden.

Dennoch muss klar sein, dass eine PSA nie formal als „vollständig“ betrachtet werden kann: es ist fraglich, ob die Sicherheits – und Risikoforschung auf dem Stand-der-Technik wirklich alle möglichen auslösenden Ereignisse für Unfälle in KKW [Sholly et al. 2000] abdecken kann; es gibt Unsicherheiten auch bei jenen Faktoren, die zu Unfällen beitragen, und in den PSA-Modellen berücksichtigt sind; einige Quellen der Unsicherheit haben eine große Bandbreite, die auf Mittelwerten beruhende Vergleiche schwierig machen; einige Faktoren, die zu Unfällen beitragen, können nur mit Schwierigkeit probabilistisch modelliert werden und sind daher meist von Sicherheits- und Risikobewertungen ausgeschlossen, z.B:

- Unabhängigkeit der Aufsichtsbehörde und der Technischen Support-Organisationen.
- Einfluss der Sicherheitskultur.
- die Frage, ob ausreichend finanzielle Mittel für die Erforschung von Problemen des Betriebs und der Sicherheit zur Verfügung stehen.
- ausreichende Zahl an qualifiziertem Personal in der gesamten nuklearen Infrastruktur.
- wirtschaftliche Stabilität des gesamten Sektors Energiewirtschaft.

- Sabotage und Terrorismus, etc..

Zu diesen theoretischen Schwachpunkten der PSA kommt noch dazu, dass in der Praxis sehr wenige PSA auf dem Stand-der-Technik existieren. Die meisten PSA decken nicht die volle Bandbreite der oben aufgelisteten Aspekte ab.

PSA-Ergebnisse für europäische KKW sind – so sie zur Verfügung stehen – in der Tabelle 3-4 aufgelistet. Zumindest Level 1 PSA und in Europa oft auch Level 2 PSA wurden für fast alle Kernkraftwerke gemacht. In manchen Fällen gibt es Einschränkungen beim Umfang, d.h. dass nicht alle PSA externe Ereignisse berücksichtigen und wenn sie berücksichtigt werden, sind seismische Ereignisse oft ausgeklammert, aus Gründen, die selten genannt werden. Die PSA für die französischen Kernkraftwerke werden nicht für die einzelnen KKW, sondern für ganze Klassen von Kernkraftwerken durchgeführt. Es wird argumentiert, dass sich die Kraftwerke so ähnlich seien, dass eine generische PSA alle Blöcke einer Serie adäquat repräsentieren kann⁶.

Bei der nachfolgenden Auflistung geht es nicht um den Vergleich von Kraftwerken – solche Vergleiche sind schwierig und aufgrund der Unterschiede der Methoden, der Daten, des Umfangs, der Annahmen etc. mit Unsicherheiten belastet. Die Ergebnisse der PSA werden hier gezeigt um einen Eindruck davon zu vermitteln, welche Bandbreite von Resultaten bei den Kernkraftwerken in Europa auftritt.

⁶ Dieses Argument ist schwer nachvollziehbar, denn selbst wenn die Kraftwerke, ihre Vorschriften, ihre Operatoren (und deren Ausbildung) und ihr Management absolut identisch wären (was natürlich nicht der Fall ist), so bleiben immer noch die externen Ereignisse, die bei jedem Standort anders sind.

Tab. 3-4 PSA ERGEBNISSE FÜR IN BETRIEB BEFINDLICHE KERNKRAFTWERKE

NPP	CDF [10 ⁻⁶ /a]	LRF [10 ⁻⁶ /a]	Kommentar zur PSA	Quelle
DWR¹				
Almaraz	5,9			CSN 2004
Ascó	22			CSN 2004
Beznau (2002)	7,9	0,26		HSK 2004
Borssele	4,5	0,03		ECN 2005
Gösgen-Däniken (1999)	18	0,31		HSK 1999
José Cabrera	22			CSN 2004
Santa María de Garoña	10			CSN 2004
Trillo	3,3			CSN 2004
Vandellós II	35			CSN 2004
WWER²				
Bohunice V1	27	21	interne & externe Ereignisse; berücksichtigte die Fertigstellung des Nachrüstungsprogramms, 2003	Gabko & Kovács 2004
Bohunice V1	54,3		PSA Reaktorabschaltung, 2003	Slovak 2004
Bohunice V2	11		interne Ereignisse, Volleleistungsbetrieb, 2003	Slovak 2004
Bohunice V2	58		interne Ereignisse, PSA Reaktorabschaltung, 2003	Slovak 2004
Kozloduy 3 & 4	16		interne & externe Ereignisse	Bulgaria 2004
Loviisa	170	5	interne & externe Ereignisse, Ereignisse Reaktorabschaltung	STUK 2004
Mochovce	3,8		interne & externe Ereignisse, 2001	Slovak 2004
Mochovce	170		Reaktorabschaltung PSA, 2002	Slovak 2004
Paks	33 bis 44		interne Ereignisse, Brand & Flutung, Ereignisse Reaktorabschaltung	HAEA 2004
Paks	290		Seismik, Durchschnitt für vier Blöcke	HAEA 2004
SWR				
Cofrentes (BWR/6, Mark III)	1,2			CSN 2004
Leibstadt	8,1	0,10	interne & externe Ereignisse, 1996	HSK 1996
Mühleberg (2002)	7,90	0,014		HSK 2002
Olkiluoto (ASEA-Atom BWR)	17	6		STUK 2004
Schwerwasserreaktor				
Cernavoda Unit 1	14		PSA für interne Ereignisse	Romania 2004
Gasgekühlte Reaktoren³				
Latina (MAGNOX) 1987	27		PSA anlageninterne Ereignisse; Kernschadenshäufigkeit für „unlimitierte Ereignisse“ (vermutlich wird auch ein Versagen des Reaktordruckbehälters mit Kernschaden berücksichtigt)	Volterra 1988
RBMK				
Ignalina	30		interne Ereignisse und beschränkt auf Level 1 (keine Berücksichtigung der Weiterentwicklung von Unfällen)	Uspuras 1999
Ignalina (Brand)	1000 ⁴			STUK 2000

¹ Die Resultate der PSA für DWR zeigen eine Bandbreite für CDFs über drei Größenordnungen. Diese Resultate decken eine Reihe von DWR von Framatome, Siemens und Westinghouse ab, die Jahrgänge der PSA reichen von 1995 bis 2003. In vielen Fällen berücksichtigen die genannten Analysen nur interne Ereignisse.

² Die PSA-Ergebnisse für die WWER decken eine große Bandbreite ab, wobei zu berücksichtigen ist, dass es drei verschiedene Basisauslegungen gibt (WWER-440/230, WWER-440/213, und WWER-1000), plus dem Unikat des KKW Loviisa (es handelt sich um einen WWER-440 Reaktor mit Sicherheitssystemen von Siemens, die sich in einem Eiskondensator-Containment befinden). Außerdem haben sich die Konzepte in den letzten 10 Jahren rasch weiterentwickelt. Einige der PSA-Studien berücksichtigen nur interne Ereignisse.

³ Für AGRs werden PSR als Teil der regelmäßigen Sicherheitsüberprüfungen gemacht (Periodic Safety Reviews PSRs) [Magne & Shepherd 2003], allerdings konnten keine publizierten Zusammenfassungen der Resultate dieser PSA gefunden werden.

⁴ Es ist davon auszugehen, dass dieser hohe CDF-Wert für den Block 2 in Ignalina im Jahr 2000, der sich ausschließlich auf Brandereignisse bezog, durch Sicherheitsmaßnahmen inzwischen gesenkt werden konnte.



lebensministerium.at

Die zur Verfügung stehenden PSA zeigen, dass die Konzepte von Generation III und III+ durchschnittliche Kernschadenshäufigkeiten haben, die um den Faktor 5 bis 10 unter dem besten Reaktorkonzept der Generation II liegen, während die durchschnittlichen Häufigkeiten für große Freisetzungen um den Faktor 10 bis 100 unter dem besten Reaktorkonzept der Generation II

angegeben werden. Allerdings gibt es wenig oder keine Betriebserfahrung mit der Generation III und III+, bei den meisten PSA-Studien handelt es sich um Konzept-Studien, für die Parameter angenommen werden, von denen die Hersteller erklären, dass sie die meisten Standortbedingungen abdecken.

Tab. 3-5 **ERGEBNISSE FÜR FORTGESCHRITTENE REAKTOREN**

Fortgeschrittene Reaktorkonzepte*	CDF [10 ⁻⁶ /a]	PSA	Quelle
ABWR (Generation III)	0,16		IRR 2004
ABWR II (Generation III*)	0,045	nur interne Ereignisse	IRR 2004
AP1000 (Generation III*)	0,51		IRR 2004
WWER-1000/392 (Tianwan design, Generation III)	5,4		IRR 2004
WWER-1500/448 (Generation III*)	0,048		

* Fortgeschrittene Reaktoren sind Reaktoren der Generation III und Generation III*, die schon in Betrieb sind oder die vermutlich bald in Betrieb gehen werden (z. B. ABWR, AP1000, EPR, und ESBWR) bis zu den fortgeschritteneren Konzepten der Generation IV, von denen in den meisten Fällen mit keinem Ein-satz vor dem Jahre 2020 oder später gerechnet wird (eine Ausnahme könnte ein PBMR Demonstrations-reaktor sein, der in Südafrika errichtet werden soll).

lebensministerium.at

Die PSA-Ergebnisse für die Generation III und Generation III+ spiegeln eine Kombination von ausdrücklicher Berücksichtigung von Unfallvorbeugung und Folgenabfederung beim Entwickeln des Konzepts, Optimierung des System- und Strukturkonzepts und den traditionellen Sicherheitsfaktoren eines Kernkraftwerkkonzepts wider. Bei Generation III und III+ Konzepten werden in der Regel manche wichtige Sicherheitsfunktionen „passiv“ erfüllt.

Es besteht eine Spannung zwischen Risiko- und Kostenerwägungen bei allen Kernkraftwerkskonzepten. Wo immer die Linie zwischen Auslegungsstörfall und Unfällen, die den Auslegungsstörfall überschreiten, gezogen wird, gibt es immer extreme Situationen mit der Möglichkeit, den Reaktorkern und das Containment zu schädigen, und daher die Freisetzung großer Mengen an Radioaktivität zu verursachen. Das Maß an Sicherheit oder Risiko bestimmt daher, was alles geschehen muss, bevor ein derartiger Unfall auftritt.

3.6 Sicherheitsstandards

3.6.1 Frühe Entwicklung der Sicherheitsstandards

Seit die ersten Kernkraftwerke in den 1950er Jahren und 1960er Jahren in Betrieb gingen, wurden die Sicherheitscodes und Sicherheitsstandards kontinuierlich erhöht aufgrund von Unfällen wie Three Mile Island (USA 1979), Tschernobyl (UdSSR 1986), von schwerwiegenden Ereignissen (z.B. Brand im Reaktor Brownsferry in den USA), von wachsender Betriebserfahrung, fortgeschrittenen Methoden in der Sicherheitsforschung und schließlich auch aufgrund einer immer kritischeren öffentlichen Haltung gegenüber der Nuklearindustrie.

Die angehobenen Sicherheitsstandards führten oft zu Programmen zur Sicherheitsverbesserung bei älteren Kernkraftwerken, doch konnten diese Nachrüstungsprogramme nicht immer

die Konzeptmängel beseitigen, die sich unter dem Aspekt des aktuellen Standes-der-Technik zeigten. Laut Govaerts et al [Govaerts et al, 1998]: „wurden damals, in den 50er und 60er Jahren, die Kraftwerke meist sehr konservativ ausgelegt, mit Sicherheitsmargen, die das unzureichende Wissen über Materialwiderstandsfähigkeit, die thermo-hydraulischen Aspekte und das langfristige Verhalten von Strukturen, Systemen und Komponenten wettmachen sollten. Die Unfallbedingungen, die bei der Auslegung in Betracht gezogen wurden, waren wesentlich weniger drastisch als bei den heutigen Kraftwerksdesigns z.B. Bruch ausschließlich von Rohrleitungen mit geringem Durchmesser, keine anthropogenen oder Naturgefahren, nur wenige Systeme wurden als sicherheitsrelevant angesehen mit dazugehöriger Forderung nach Redundanz und physischer Trennung. Für die erneute Bewertung der Sicherheit dieser Kraftwerke ist das erste Hindernis den genauen Status des Kraftwerks zu ermitteln. Daten über das Originalkonzept fehlen vielleicht, die Anlagenqualifizierung ist nicht vollständig oder unbekannt, vom ursprünglichen Hersteller können keine Informationen mehr eingeholt werden. Darüber hinaus scheint es in manchen Ländern keine detaillierten Vorschriften dafür zu geben, dass die Sicherheitsdokumentation aktualisiert werden muss, wenn während des Kraftwerksbetriebs Modifikationen durchgeführt werden.“

Dem Bericht der IAEA International Nuclear Safety Advisory Group INSAG-8 [INSAG-8, 1995] zufolge werden sich die Standards auch weiterhin erhöhen:

„1. Die Sicherheitsstandards für Kernkraftwerke haben sich seit die ersten Kraftwerke in den 1950ern entworfen wurden weiterentwickelt. Es ist zu zahlreichen Veränderungen mit dem Heranreifen der Nuklearindustrie gekommen und es wird zu weiteren kommen, als Folge des Wachstums von Wissen und Erfahrung sowohl mit dem Design als auch dem Betrieb und weil die Ansprüche an Sicherheit und Zuverlässigkeit größer werden.“

2. Die meisten Kraftwerke haben eine geplante Designlebensdauer von 30 bis 40 Jahren und es ist daher unvermeidlich, dass alle Kraftwerke irgendwann von den sich weiter entwickelnden Technologien und Standards überholt werden.“

3.6.2 Aktuelle Sicherheitsstandards, -ziele und -vorgaben

Die Arbeitsgruppe International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG), die nach dem Unfall in Tschernobyl eingerichtet wurde, hat minimale Sicherheitsstandards für aktuell laufende KKW und für künftige KKW definiert. Diese Sicherheitsziele lauten im Prinzip folgendermaßen [INSAG-3, 1988]:

- Für in Betrieb befindliche KKW gilt eine Kernschadenshäufigkeit (CDF) von unter $10^{-4}/a$, und eine Häufigkeit für große Freisetzungen (LRF) von unter $10^{-5}/a$.
- Für künftige KKW gilt eine CDF von unter $10^{-5}/a$ und eine LRF von unter $10^{-6}/a$.

Diese Werte wurden bei der ersten Revision von INSAG-3 im Jahre 1999 [INSAG-12, 1999] nicht verändert.

Manche Länder haben für ihre KKW eigene Sicherheitsziele aufgestellt oder die der IAEO genauer ausgeführt. Schweden z.B. hat keine ausdrücklichen Anforderungen der Aufsichtsbehörden an die maximale Kernschadenshäufigkeit, aber die Energieversorger haben probabilistische Ziele zur internen Verwendung festgelegt. Sicherheitsmaßnahmen sind prioritär zu behandeln, wenn

der Wert der Kernschadenshäufigkeit (CDF) $10^{-5}/a$ mit hoher Zuverlässigkeit überschreitet oder die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung von mehr als 0,1 % des Kerninventars (unter Ausschluss der Edelgase) über $10^{-7}/a$ [CNS-Bericht Schweden, 1998]. Strengere Sicherheitsziele wurden auch in den Niederlanden eingeführt, wo eine Freisetzungshäufigkeit für LRF von unter $10^{-6}/a$ verlangt wird.

Allgemein gültige Vorschriften über den Sicherheitsnachweis von Kernkraftwerken (OPB-88) wurden in Russland 1990 eingeführt und sind für alle Projekte anzuwenden, die nicht vor der Einführung von OPB-88 kommissioniert wurden. Diese Ziele sind um eine Größenordnung strenger als die von INSAG 3: „Um die Notwendigkeit einer Evakuierung der Bevölkerung in der Nähe von Kernkraftwerken zu vermeiden, soll als Ziel die Unfallhäufigkeit von $10^{-7}/\text{Reaktor und Jahr}$ für große Radioaktivitätsfreisetzungen nicht überschritten werden“ [OPB-88, Kapitel 1.2.17].

In den letzten Jahren hat die Europäische Kommission einen Vorschlag für gemeinsame Sicherheitsstandards in der EU und eine Revisionen dazu veröffentlicht (EC 2003/2004). Trotz beträchtlicher Bemühungen konnte jedoch keine Zustimmung dazu bei den Mitgliedstaaten erzielt werden (siehe auch die Ausführungen von M. Rotter in „Nachhaltigkeit der Gewinnung von elektrischer Energie aus Nuklearenergie - Die rechtliche Dimension“ in dieser Publikation).

3.6.3 Einhaltung der Sicherheitsziele und Sicherheitsstandards

Wie die folgenden Beispiele zeigen halten nicht alle Kernkraftwerke die IAEO-Mindeststandards für in Betrieb befindliche Kernkraftwerke ein. Die US Atomaufsichtsbehörde NRC forderte im November 1988 in ihrem Generic Letter (GL) 88-20 alle Lizenzinhaber auf, eine Individuelle Kraftwerksuntersuchung (Individual Plant Examination - IPE) durchzuführen, spezifische Verletzlichkeiten ihres Kraftwerkes für schwere Unfällen festzustellen und die Ergebnisse zu melden. Die folgenden Ergebnisse wurden auf der Grundlage einer IPE-Datenbank der NRC vom April 1997 [NRC, 1997] zusammengestellt:

Anzahl von KKW in der Datenbank	91	100 %
Anzahl von KKW am oder über dem INSAG-3 Sicherheitsziel für Kernschadenshäufigkeit CDF ($10^{-4}/a$)	12	13 %
Anzahl von KKW am oder über dem INSAG-3 Sicherheitsziel für große Freisetzungen ($10^{-5}/a$)	24	26 %

Das bedeutet, dass in der betrachteten Periode ungefähr ein Viertel aller in der Statistik erfaßten Kernkraftwerke die INSAG Sicherheitsziele für große Freisetzungen nicht erreicht hat, und mehr als ein Zehntel nicht einmal jene für Kernschmelze (CDF). Leider sind keine aktualisierten Zahlen verfügbar.

Die Vereinigung der Westeuropäischen Aufsichtsbehörden WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) hat im Rahmen ihrer Initiative zur Harmonisierung der Sicherheitsstandards in Europa nationale Bewertungen⁷ zur Erfüllung der WENRA Safety Reference Levels veröffentlicht. Das erlaubt einige Schlussfolgerungen über die Einhaltung der (nicht-quantitativen) Sicherheitsstandards der IAEO:

⁷ Bei diesen Bewertungen handelt es sich um Selbstbewertungen der einzelnen nationalen Aufsichtsbehörden; sie sind teilweise erstaunlich optimistisch.

- In einigen Ländern Europas sind die formellen rechtlichen Anforderungen an die nukleare Sicherheit nicht in Übereinstimmung mit den IAEA Sicherheitsstandards.
- Es gibt einige wenige europäische Länder, in denen die IAEA Sicherheitsstandards nicht vollständig in allen in Betrieb befindlichen KKW umgesetzt sind.

Diese Schlussfolgerungen sind bemerkenswert angesichts des anscheinend universellen Konsenses, dass die Sicherheitsstandards der IAEA im Prinzip in jedem Land eingehalten werden müssen. Auch abgesehen davon macht die Anstrengung der WENRA klar, dass es notwendig ist, die Sicherheitsstandards in den KKW der EU zu erhöhen.

Reaktoren sowjetischen Konzepts werden spezifische Sicherheitsprobleme zugeschrieben und im Westen besteht allgemeiner Konsens, dass die Sicherheitsniveaus einiger sowjetischer Reaktoren dringend angehoben werden müssen.

Die IAEA hat spezielle extra-budgetäre Programme zur Verbesserung der Sicherheit in den Nuklearanlagen der osteuropäischen Länder mit sowjetischen Reaktoren (WWER und RBMK) entwickelt [IAEA,1999]: *„Ziel dieses Programmes ist die Stärkung der nuklearen Sicherheit in den Ländern in dieser Region, und insbesondere die Verbesserung der technischen Fähigkeiten der Aufsichtsbehörden und der Technischen Support-Organisationen, der Sicherheitsinfrastruktur und der Entwicklung der Humanressourcen“* da *„Trotz der bereits erzielten Fortschritte im Sicherheitsbereich noch viel bei einzelnen KKW gemacht werden muss, im speziellen bei den WWER und RBMK der ersten Generation.“*

Die US-amerikanische Behörde GAO (General Accounting Offices), die in etwa dem österreichischen Rechnungshof entspricht, schreibt in ihrem Bericht über die Sicherheit der Reaktoren sowjetischen Konzepts: *„Die Reaktoren sowjetischen Konzepts weisen meist Mängel auf, wie etwa unzureichenden Brandschutz, Materialien und Konstruktionen von geringer Qualität und unzureichende Trennung und Redundanz der Sicherheitssysteme. Außerdem befinden sich viele dieser Reaktoren in Ländern wie Russland und der Ukraine, die über keine unabhängige oder effektive Aufsichtsbehörde verfügen zur Kontrolle der nuklearen Sicherheit. Besonders beunruhigend sind die 25 der gesamt 59 Reaktoren, von denen westliche Sicherheitsexperten übereinstimmend sagen, dass sie weit unter den international akzeptierten Sicherheitsstandards liegen und zu wirtschaftlichen Bedingungen nicht nachgerüstet werden können.“*[GAO,2000]

Die Europäische Kommission kam 1993 zu folgender Schlussfolgerung: *„Obwohl es offensichtlich ist, dass die Nuklearanlagen sowjetischen Konzepts generell Sicherheitsprobleme aufweisen, so ist die Situation doch von Reaktor zu Reaktor verschieden, auch in der Art wie sie betrieben werden und in welchem Land sie sich befinden:*

- *die Reaktoren vom Typ WWER-230 und RBMK haben prinzipielle Konzeptmängel, die nicht vollständig behoben werden können, während der WWER-213 und der WWER-320 deutlich nachgerüstet werden können, trotz des fragwürdigen Konzepts einiger Kraftwerkskomponenten;*
- *das regulatorische, technische und industrielle Umfeld sowie die Ingenieurskultur sind von Land zu Land unterschiedlich.“*[EC,1993]

Die Bedeutung der gesellschaftspolitischen und sozio-ökonomischen Faktoren wurde in der Unfallanalyse von Three Mile Island [Kemeny, 1979] ebenso wie in der Analyse der Unfallsituation in Tschernobyl [Steinberg et al. 1991] hervorgehoben.

3.7 Künftiges Sicherheitsniveau von Kernkraftwerken und sich abzeichnende Probleme

Diese Kapitel behandelt kurz sich abzeichnende Probleme, deren Art und Wichtigkeit in Entwicklung begriffen sind.

3.7.1 Alterung von Kernkraftwerken

Die Alterung erhöht das Risiko eines Versagens einzelner Komponenten oder des Systems als Ganzes. Alterung von Materialien ist ein unvermeidbares qualitätsbeeinträchtigendes Phänomen, das durch verschiedene Arten von Belastungen im Betrieb entsteht. Mechanische Eigenschaften (z.B. Stärke, Festigkeit, Elastizität) von sehr verschiedenen Materialien wie Druckbehälterstahl, Brennstoffhülsen, oder sogar Stahlbeton können betroffen sein. Qualitätsverlust durch Alterung betrifft auch elektrische, elektronische, opto-elektronische und magnetische Eigenschaften, z.B. von Teilen in elektronischen Anlagen. Die Belastungen dieser Materialien können mechanischer, thermischer, chemischer oder radiologischer Natur sein. Wenn sie gleichzeitig auftreten, können Belastungen unterschiedlicher Natur zu synergistischer Verstärkung ihrer qualitätsmindernden Wirkungen führen. Versprödung des Druckbehälterstahls im Bereich des Reaktorkernes, der gleichzeitig dem Neutronenbeschuss, chemischen Angriffen (z.B. Korrosion durch Wasserstoffdiffusion) und Ermüdung durch mechanische Wechselbelastungen ausgesetzt ist, ist ein wichtiges Beispiel für Alterung. Mit zunehmender Alterung kann eine zusätzliche thermo-mechanische Belastungstransiente (Thermischer Schock), z.B. unter Notfallsbetriebsbedingungen, zum Bruch der gealterten Stahlkomponente führen.

Obwohl Kraftwerke, die in den 1970er und 1980er Jahren genehmigt wurden, im allgemeinen für eine Lebensdauer von 30-40 Jahren [INSAG-14, 1999] konstruiert wurden, blieben viele der früheren Anlagen nicht länger als 20 oder 25 Jahre am Netz. Die übrigen erreichen nun ein Stadium, in dem sich das Risiko systematisch erhöht.

Aufgrund der Schwierigkeiten und Investitionen, die mit der Genehmigung neuer Kernkraftwerke einhergehen, untersuchen nun einige Betreibergesellschaften die Möglichkeit einer Lebensdauererweiterung auf 45, 50 oder sogar 60 Jahre. Das kann allerdings, wie die IAEO betont, zusätzliche Risiken bedeuten: *„Die Alterung von Kernkraftwerken kann, wenn damit nicht richtig umgegangen wird, zu einem Absinken des Sicherheitsniveaus unter das Referenzsicherheitsniveau führen, das durch das Konzept und die Konstruktion des Kraftwerks bestimmt ist und vor der Inbetriebnahme des Kraftwerks von der Aufsichtsbehörde akzeptiert wurde.“* [INSAG-14, 1999]

3.7.2 Verringerung des Know-how und der Infrastrukturkapazitäten

Die ursprünglichen Hoffnungen in die Kernenergie als unbegrenzte Energiequelle führten zu einem Aufblühen der Nuklearindustrie, das zahlreiche qualifizierte Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker anzog. Der dramatische Rückgang bei Bestellungen und Bau von Kernkraftwerken in den Ländern des Westens in den letzten Jahrzehnten veränderte die Situation: es besteht ein Mangel an ausgebildetem Personal, ein Rückgang an Technischen Support-Organisationen, ein

zunehmender Mangel an Ersatzteilen in Nuklearqualität, etc. *„Dem Betrieb von Kernkraftwerken zugrundeliegend sind die „host activities“ – zusammen Infrastruktur genannt – bei Konzept, Konstruktion, Aufsicht, Ausbildung und Forschung. Während all diese Aktivitäten zur Sicherstellung einer sicheren und wirtschaftlichen Stromproduktion beitragen, erleben sie in vielen OECD-Ländern einen Rückgang.“* [NEA, 1996]

Die Nuklearindustrie macht die Erfahrungen jeder rückläufigen Industrie, doch im Falle der Nuklearindustrie bedeutet dies eine Erhöhung des Risikos zu einer Zeit da die Alterung der Anlagen zusätzliche Vorsichtsmaßnahmen erfordern würde.

3.7.3 Liberalisierung des Strommarktes / Senkung der Sicherheitsfaktoren

Die Liberalisierung des Strommarktes hat einen verstärkten Wettbewerb bewirkt und wird diesen noch verstärken, in dem Maße in dem die Konsumenten den Umgang mit dem deregulierten Markt lernen. Das gibt Anlass zu Befürchtungen, dass die Aufrechterhaltung der Sicherheit und ihre Erhöhung durch Nachrüstungen gefährdet sein könnten: *„Die Aufsichtsbehörden berichten als wichtigstes Sicherheitsproblem Anzeichen von Arbeitsüberlastung bei den Kernkraftwerksorganisationen und starke Konkurrenz um qualifizierte Spezialisten, während gleichzeitig der wirtschaftliche Wettbewerb auf dem deregulierten Markt härter wird.“* [CNS Bericht von Schweden 1998]. Praktische Beispiele für die Folgen des Kostendruckes sind die Verringerung der Mitarbeiteranzahl (in Grohnde in Deutschland z.B. wurden die Mitarbeiter zwischen 1990 und 2004 von 340 auf 300 reduziert, wobei 90 % der Reduktion Techniker betraf), und Generalrevisionen von Turbinen, die nun alle 12 Jahre statt wie bisher alle 6 Jahre durchgeführt werden, d.h. eine Verdoppelung des Inspektionsintervalls [Bruns 2004].

Ein anderes besorgniserregendes Beispiel ist die Absenkung von IAEA Richtlinien und nationalen Standards und Vorschriften. So wurden z.B. in den neuen IAEA Empfehlungen 2006 für WWER-PTS Analysen (vgl. Abschnitt 3.2.2.1) die strukturellen Sicherheitsfaktoren im Vergleich zu den früheren Empfehlungen deutlich abgesenkt. Diese neue Ausgabe [IAEA 2006] wurde parallel mit dem Genehmigungsverfahren des Kernkraftwerkes Temelin entwickelt und sie wurden sofort in das Tschechische Gesetz übernommen. Zur Zeit der Inbetriebnahme waren die alten IAEA Empfehlungen [IAEA 1997] Teil des tschechischen Gesetzes. Der Nachweis der strukturellen Integrität des Reaktordruckbehälters von Temelin über die gesamte projektierte Lebenszeit wäre nach den alten IAEA Empfehlungen nicht möglich gewesen [Batishchev 2005, Austrian Expert Team 2001].

In anderen Fällen werden Standards und Vorschriften zugunsten von sogenannten Expertenurteilen („expert judgement“) außer Kraft gesetzt⁸, eine heikle Angelegenheit angesichts der geringen Zahl von Nuklearexperten, von denen die meisten von der Nuklearindustrie abhängig sind.

In Deutschland hat eine Arbeitsgruppe des Deutschen Ministeriums für Wirtschaft und Technologie die Notwendigkeit aufgezeigt, die Auswirkungen der Änderungen in den Management- und Organisationsstrukturen im Energiemarkt als Folge der Fusionen von Energieversorgern vor allem auf die Sicherheit der Kernkraftwerke und deren Sicherheitskultur zu untersuchen [BMW i Arbeitsgruppe 2000].

⁸ Vgl. z.B. IAEA Experts Meeting 1998 zusammen mit Hofer et al. 2001

Während es fraglich ist, ob die schwerwiegenden nuklearen Ereignisse der letzten Jahre bereits eine Folge der Bemühungen um Kostenreduktion im liberalisierten Markt sind, zeigen sie doch deutlich auf, dass mehr Anstrengungen bei der Sicherheitskultur und bei Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind. Es ist allerdings schwer vorstellbar, wie diese Anstrengungen gemacht werden sollen, angesichts der aktuellen wirtschaftlichen Einschränkungen (vgl. auch Frogatt, H. „Nukleare Energie – Die Wirtschaftliche Frage“ in dieser Publikation).

Die Nuklearindustrie erlebte in den letzten rund 15 Jahren eine bemerkenswerte Konsolidierungsphase. Heute gibt es weniger und größere Organisationen, die Kernkraftwerke weltweit betreiben. Viele dieser Organisationen verzeichnen Jahr für Jahr Rekordgewinne, und dennoch klagen dieselben Unternehmen über einen Mangel an Absolventen aus einschlägigen Studienrichtungen und Kürzungen der staatlichen Mittel bei Forschung und Entwicklung.

Der folgende Text, den der Vorsitzende von INSAG (und Ex-Vorsitzender der US-amerikanischen Aufsichtsbehörde NRC) im März 2006 geschrieben hat, dient als Beispiel [Meserve 2006]: *„Die Verlangsamung in der Nuklearindustrie in den letzten beiden Dekaden führte zu einem geringeren Kader an hoch qualifizierten Experten, weniger Kerntechnik-Absolventen und weniger weltweite Finanzierung für Sicherheitsforschung als noch vor 20 Jahren. Außerdem dürfte das nukleare Know-how in Betreibergesellschaften und bei Aufsichtsbehörden in manchen Fällen dünn werden. Dieses Problem wird noch von dem Trend in manchen Unternehmen mit Verantwortung für den Betrieb von Kernkraftwerken verstärkt sich immer stärker auf Manager mit Erfahrungen im Finanzbereich zu verlassen, auf Kosten von solchen mit kerntechnischem Wissen. Eine gezielte Anstrengung zum Wiederaufbau der nuklearen Infrastruktur sollte hohe Priorität haben, aber die Fortschritte sind bisher nur sehr langsam.“*

Dieselbe Industrie, die einsieht, dass *„ein Unfall irgendwo, ein Unfall überall ist“*, scheint nicht zu verstehen, dass im freien Markt manche Regierungen aufgehört haben die Nuklearindustrie mit Subventionen zu unterstützen. (Wobei es natürlich Ausnahmen gibt). Paradoxaerweise werden immer wieder die Regierungen aufgerufen Programme zu finanzieren, die so offensichtlich im Interesse der Industrie liegen, dass es oft unerklärlich ist, warum die Industrie diese nicht schon längst selbst finanziert. So lautete zum Beispiel eine Empfehlung einer MIT – Studie [MIT 2003], dass das US-amerikanische Energieministerium über fünf Jahre 50 Millionen USD (etwa 42 Millionen Euro) jährlich für eine globale Schätzung der Uranerzressourcen zur Verfügung stellen soll. Solch eine Schätzung wird vielleicht gebraucht (vor allem wenn die Industrie auf eine Ausweitung in den nächsten Jahrzehnten hofft), aber es gibt keinen Grund warum es die Verantwortung des Staates sein soll, dies zu finanzieren. Wenn die Nuklearindustrie als etablierte Industrie, die 16% der weltweiten Elektrizität produziert, nicht erkennt, dass das Wissen um ihre eigene Brennstoffbasis in ihrem ureigenen Interesse liegt, warum sollten dann die Regierungen diese Branche vor ihrer eigenen Kurzsichtigkeit retten? Ein freier Markt wird solche Fehler mit der für ihn typischen Härte korrigieren.

3.7.4 Wissensmanagement

Mit der Alterung der Kernkraftwerke (und deren Mitarbeiter) und dem näherrückenden Ende der Betriebsdauer der Kernkraftwerke, ist anzunehmen dass erfahrenes Personal der Industrie in Pension gehen oder seine Chancen in anderen Unternehmen ergreifen wird, da der Kampf um erfahrenes Personal härter wird. Unter diesen Bedingungen müssen die Kernkraftwerksbetreiber auf Wissensmanagement setzen – d.h. sicherstellen, dass unter allen Umständen das Wissen

über den sicheren Betrieb der Anlagen (einschließlich der Wartung der Kraftwerke, der Sicherheitsnchrüstungen, dem Management von abgebranntem Brennstoff und radioaktivem Abfall und schließlich der Dekommissionierung der Kraftwerke) dem Unternehmen erhalten bleibt.

Wissensmanagement ist eine wichtige Überlegung für Nukleare Aufsichtsbehörden, technische Support-Organisationen, Hersteller und Betreibergesellschaften. (Die Nuklearindustrie steht allein vor dem Problem des Wissensmanagements. Ähnliche Erwägungen gibt es auch bei anderen Industriebranchen und Funktionen, z.B. bei der Aufrechterhaltung von Sicherheit und Zuverlässigkeit von Kernwaffen und Weltraumtransportsystemen). Wissensmanagement wird ein zunehmend wichtiger Faktor auch für Länder, die den Ausstieg aus der zivilen Kernkraftnutzung beschlossen haben.

Im IAEA-Sicherheitsbericht (Nuclear Safety Review) von 2005 (für die Situation im Jahre 2004) wird das Problem prägnant formuliert [IAEA 2005b]: *Es besteht allgemeine Übereinstimmung, dass das bestehende Sicherheitswissen nicht völlig extrahiert und analysiert wurde um die gemachten Erfahrungen miteinander zu teilen und im Wissen und Verhalten von Nuklearorganisationen einzubetten. In seinen abschließenden Worten sagte der Vorsitzende der Wissensmanagement-Konferenz in Saclay in Frankreich im September 2004, dass „das Wissensmanagement das Herz der Sicherheitskultur darstellt und dass die Entwicklung des Einzelnen im Prozess des Wissensmanagements zentral ist. ... Eine der entscheidenden Herausforderungen ist es, nicht nur explizites Wissen, wie etwa Datenbanken, Dokumente oder Prozesse, zu managen, sondern auch implizites Wissen, wie etwa persönliches Wissen, Fähigkeiten und Eignungen. Um langfristig bestehen zu können ist es essentiell eine Unternehmenskultur, wo die Weitergabe von Sicherheits-Know-How eine Priorität ist, zu fördern.“*

3.7.5 Seismische Gefährdung

Viele Kernkraftwerke sind einer höheren Erdbebengefährdung ausgesetzt als man zunächst angenommen hat. Einerseits wurde die Erdbebengefährdung oft entweder vernachlässigt oder man ging davon aus, dass das Auftreten starker Beben zumindestens während der Lebensdauer der Kraftwerke sehr unwahrscheinlich sei. Obwohl die Reaktorgebäude selbst so dimensioniert sein mögen, dass sie einem Erdbeben standhalten könnten, wurde die Verletzbarkeit von Nebeneinrichtungen, wie Tanks, Stromleitungen, etc., nicht beachtet; dies kann katastrophale Folgen haben.

Andererseits wurden die wissenschaftlichen Methoden, die in den vergangenen 20 Jahren entwickelt und in die Empfehlungen der IAEO aufgenommen wurden, noch nicht von allen Mitgliedsstaaten umgesetzt. Möglicherweise sind die hohen Kosten für die wissenschaftlichen Untersuchungen oder die noch wesentlich höheren Kosten für die in Folge eventuell notwendigen Nachrüstungen eines Kraftwerks der Umsetzung der neuen Verfahren nicht förderlich. Bisher wurde jenes Erdbeben ausgewählt, das als das bisher stärkste Erdbeben angesehen wurde, oder ein starkes Erdbeben in der näheren oder weiteren Umgebung, an oder nahe einer bekannten seismischen Verwerfung, und eine Intensitätsabnahme mit der Distanz zwischen Epizentrum oder Bruchlinie und Kernkraftwerksstandort angesetzt. Durch das Hinzufügen eines Wertes von 0,5 oder 1 zu der reduzierten Intensität und wurde der Wert für das maximale Auslegungsbeben (safe shutdown earthquake - SSE) bestimmt. Es versteht sich von selbst, dass das stärkste historische Erdbeben nicht notwendigerweise das an einer bestimmten Bruchlinie maximal mögliche ist, welches das Kraftwerk betreffen könnte. Es ist nämlich unmöglich das größte anzunehm-

mende Beben (maximum credible earthquake MCE) anhand historischer Daten zu bestimmen, wenn diese kaum mehr als 500 Jahre zurückreichen.

Aber die mögliche Existenz von solchen seltenen starken Beben in der Vergangenheit kann mit Hilfe moderner seismo-tektonischer Methoden (Paläoseismologie, Neotektonik, Geomorphologie) nachgewiesen werden. Die Wiederkehrfrequenz seltener starker Beben muss daher aus geologischen und paläoseismologischen Belegen abgeleitet werden, die Informationen liefern können über Ereignisse, die im Verzeichnis historischer Beben unterrepräsentiert sind. Erdbeben von sehr hoher Intensität aber sehr geringer Wahrscheinlichkeit können in den Archiven der Sedimente gefunden und deren Alter, Datum und Größe errechnet werden. Diese Resultate sollten dann bei Standortgenehmigungen für neue Kraftwerke und bei der seismischen Evaluierung existierender Kraftwerke berücksichtigt werden. Paläoseismologische Methoden (geomorphologische und neotektonische Studien, Grabungen, Datierung des Alters der jüngsten Bewegungen an Bruchlinien) und die Berücksichtigung langer Wiederkehrintervalle von starken Erdbeben wurden im IAEA Safety Guide S1, 1st revision, 1991 und NS-G-3.3, 2002 empfohlen.

3.7.6 Klimawandel

Wie die geographische Verteilung der Kernkraftwerksstandorte zwischen rund 35° südlicher Breite bis rund 70° nördlicher Breite zeigt, wurden Kernkraftwerke in vielen verschiedenen Klimazonen errichtet und betrieben. Daher ist nicht anzunehmen, dass der aktuelle Klimawandel die Energieerzeugung in Kernkraftwerken unmöglich machen könnte. Allerdings sind viele der externen Gefährdungen, die eine Bedrohung für Kernkraftwerke darstellen können (Tabelle 3-2) direkt oder indirekt vom Wetter oder Klima abhängig. Das gilt für Naturphänomene, deren Ausmaß, Intensität und Eintrittshäufigkeit, aber auch für Gefährdungen aus Aktivitäten von Menschen, die häufig mit Versagen von Systemen oder benachbarten Anlagen, die keine KKW sind, zusammenhängen. In einem weiteren Sinn könnte man auch argumentieren, dass Krieg und Terrorismus auf Probleme zurückzuführen sind, die teilweise mit dem Klimawandel und inadäquaten nationalen und internationalen Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel zusammenhängen. Da die Auslegung der Kernkraftwerke und die Sicherheitsmaßnahmen für jedes KKW auf bestimmten Annahmen über externe Gefährdungen beruhen, muss sichergestellt werden, dass die Sicherheitsstandards unter Berücksichtigung des bereits eingetretenen und des in nächster Zukunft erwarteten Klimawandels über die gesamte Lebensdauer jedes Kraftwerks aufrecht erhalten werden können.

Extreme Hitze kann zu einer Überschreitung der Temperaturgrenzwerte innerhalb der KKW führen, die zum Schutz der Instrumente dienen, die den Reaktor steuern und die bei Funktionsfehlern auch potentiell schwerwiegende Gefährdungen eindämmen [Schwartz 2003]. Hitze kann auch die Wirksamkeit der letzten Wärmesenke und daher die Ausbeute thermischer Kraftwerke verringern.

Häufigeres Auftreten von schweren Niederschlägen sowie häufigere und längere Dürreperioden wurden gleichzeitig beobachtet und werden mit dem sich verändernden Klima weiterhin eintreten. Dürre ist oft auch von geringer Wasserführung in Flüssen und Strömen begleitet. Im Rekordsommer von 2003 mussten viele Kraftwerke, auch Kernkraftwerke, geschlossen werden: extrem heißes Wetter und Regenmangel führten zu einem niedrigen Wasserstand in den Flüssen, das dann auch nicht die für die Kühlung erforderlichen niedrigen Temperaturen aufwies [Schwartz 2003]. Die vermehrten starken Niederschläge werden vermutlich zu mehr Hochwassern führen, sofern nicht durch Renaturalisierung von Einzugsgebieten, Flüssen und Ufern ein verbessertes Rückhaltepo-

tential erreicht wird. Die Behörden in Frankreich reagierten im Jahre 2000 auf die Überflutung des KKW Le Blayais indem sie eine Aktualisierung der Risikobewertung für Hochwasser verlangten, bevor das KKW wieder in Betrieb genommen werden durfte [NE 2000].

Unter speziellen Umständen können Schneefall, Hagel und Graupel relevant werden. Erdbeben sind häufig eine Konsequenz dieser Ereignisse. Die tiefere Ursache sind oft die Bodenbearbeitungsmethoden, Bauarbeiten oder, in alpinen Gebieten, Auftauen von Permafrost. So blockierte im Jahr 2002 ein riesiger Erdbeben von 400.000 m³ einen Fluss und setzte somit das nukleare Abfalllager in der Nähe von Maylisu im Süden von Kirgistan der Gefahr der Überflutung aus [NE 2000].

Auch die geographischen Verhaltensmuster von tropischen Stürmen (Hurrikane), außertropischen Stürmen und Tornados, wie auch deren Häufigkeit und Intensität verändern sich. Das könnte bei einigen Kernkraftwerken Anpassungen notwendig machen. Im Jahre 1998 fegte ein Tornado über das KKW Davis-Besse und der Kontrollraum wurde kurze Zeit finster, mit der Ausnahme der Instrumentation und der Notbeleuchtung, dann schaltete sich der Reaktor automatisch ab. Da die Telekommunikationsleitungen von dem Tornado zerstört worden waren, war ein Informationsaustausch sehr schwierig. Die Notsituation dauerte etwa 40 Stunden an [NE 2000].

Die Szenarien für die Erhöhung der Meeresspiegel haben sich aufgrund verbesserten Verständnisses der Eisschmelze in den Polarregionen in letzter Zeit stark verändert. Erhöhungen über 1 m innerhalb der nächsten 100 Jahre scheinen nicht mehr ausgeschlossen. Das wird einige KKW an Küsten betreffen.

3.7.7 Zunehmende soziale und politische Instabilität

Weltweite Entwicklungen, wie das schnelle Bevölkerungswachstum bei schrumpfenden natürlichen Ressourcen und wachsender Unfähigkeit der Gesellschaft, Ressourcen und Wohlstand gerechter zu verteilen, erhöhen das Risiko von „feindlichen Handlungen“, vor allem von Terrorismus und Krieg [Bouthoul 1972, Heinsohn 2003].

Jede Anlage oder Struktur mit einem hohen Katastrophenpotential (z.B. große Mengen aufgestauten Wassers, hohe Konzentrationen von toxischem Material oder Energie auf engem Raum) muss als attraktives Ziel für solche Angriffe betrachtet werden. De facto können sie aber nicht zuverlässig geschützt werden. Das gilt im Besonderen für Kernkraftwerke, die - wie bereits beschrieben - ohnehin gegenüber verschiedenen internen und externen Gefährdungen anfällig sind. Auch die fortgeschrittensten künftigen „inhärent sicheren“ Kraftwerke werden gegenüber gezielten Attacken verwundbar sein.

3.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der Unfall im Reaktor von Tschernobyl 1986 hat in dramatischer Weise vor Augen geführt, dass trotz der extrem geringen Wahrscheinlichkeit von schweren Unfällen in Kernkraftwerken solche dennoch vorkommen und dass deren Folgen (für Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft, usw.) äußerst ernst sein und große Gebiete über lange Zeiträume betreffen können. Mit 443 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken und Projektionen großer Zuwächse – wie immer die Umsetzungsmöglichkeiten auch eingeschätzt werden – ist und bleibt offenbar die nukleare Sicherheit ein Thema.

Probleme der nuklearen Sicherheit sind nicht auf Kernkraftwerke beschränkt. Die vielfachen Risiken, die in diesem Beitrag nicht behandelt werden, umspannen den ganzen Brennstoffzyklus von der erstmaligen Urangewinnung bis zum künftigen weltweiten Ausstieg aus der Kernenergie. Aber selbst danach werden die Risiken der Lagerung von radioaktivem Abfall als Langzeitbelastung über geologische Zeiträume bestehen bleiben.

Eine Abfolge von „Generationen“ spiegelt die Evolution der Reaktorkonzepte wieder, mit unterschiedlichen Herangehensweisen an Energiegewinnung und Reaktorsicherheit. Der Großteil der zur Zeit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke zählt zur Generation II, sodass deren Sicherheitscharakteristika die nukleare Sicherheit derzeit bestimmen. Es gibt gegenwärtig sehr wenige Reaktoren der Generation III, und die Generation IV befindet sich erst im Entwicklungsstadium.

Für die kommende Generation von Reaktoren (Generation III) wurden die Konzepte modifiziert, um eine Reihe von vorhersehbaren Unfällen passiv beherrschen zu können („inhärente Sicherheit“) und die Kernschmelzhäufigkeit zu reduzieren. Die „inhärente Sicherheit“ ist jedoch bisher weder erwiesen noch umfassend: Sie gilt a priori nur für Auslegungsstörfälle, nicht für externe Bedrohungen und keinesfalls gegenüber Terror- oder Kriegsakten. Die Liberalisierung des Strommarktes und die Kürzung der staatlichen Förderungen der Nuklearindustrie erzwangen eine Überarbeitung dieser Konzepte zur Senkung der Kapitalkosten (Generation III+).

Die erklärten Ziele für die Generation IV – im Wesentlichen schnelle Reaktoren – sind, „inhärent sicher“, proliferationsresistent, wirtschaftlich und frei von langlebigen hochradioaktiven Abfällen zu sein. Schnelle Reaktoren haben jedoch eine Reihe von Nachteilen, die sie in der Errichtung teuer und im Betrieb schwierig machen. An der gleichzeitigen Erreichbarkeit dieser Ziele werden daher beträchtliche Zweifel geäußert. Die auftretenden Sicherheitsprobleme unterscheiden sich stark von den Problemen, die aus den früheren Generationen bekannt sind. Allerdings ist es sehr schwierig deren Sicherheit heute einzuschätzen, da sie sich erst in der Konzeptphase befinden und es nur sehr wenige Studien über Sicherheitsaspekte gibt.

Soll der Beitrag der Kernenergie zur Gesamtenergieerzeugung in Zukunft in einem Umfeld zunehmenden Energiebedarfes wachsen, so wird das nukleare Risiko von den Sicherheitscharakteristika der Anlagen der Generation III oder III+ und längerfristig – aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von spaltbarem Uran – jener der Anlagen der Generation IV geprägt.

Ein Überblick über die Verwundbarkeiten der häufigsten Reaktortypen und der vier Generationen zeigt, dass sie alle Schwachstellen haben, die zu schweren Unfällen mit Freisetzung großer Mengen von Radioaktivität in die Umwelt führen können, trotz der Bemühungen, solche Schwachstellen zu eliminieren und trotz unbestrittener Fortschritte, die erzielt wurden.

Es besteht immer eine Spannung zwischen Sicherheits- und Kostenüberlegungen bei Kernkraftwerkskonzepten und Betrieb. Sicherheitsrichtlinien und Standards wurden zwar wiederholt angehoben, jedoch die Nachrüstung bereits in Betrieb befindlicher Anlagen hat häufig mit dieser Entwicklung nicht Schritt gehalten.

Die US NRC hat 1997 festgestellt, dass etwa ein Viertel der Kernkraftwerke die INSAG-Grenzen der Freisetzungswahrscheinlichkeit großer Radioaktivitätsmengen, und immer noch ein Zehntel jene der Kernschmelzewahrscheinlichkeit nicht erfüllt haben. Die WENRA hat kürzlich gefunden,

dass nicht in allen Ländern Europas die IAEA Sicherheitsstandards vollständig eingehalten werden – obwohl die Einhaltung dieser Anforderungen als allgemeiner Konsens gilt.

Dies, zusammen mit den Unfällen von Three Mile Island und Tschernobyl, einer Serie von Ereignissen, Vorläufern, „near-misses“, Fällen krasser Defizite in der Sicherheitskultur, etc. zeigt, dass gegenwärtig die Sicherheitsproblematik keinesfalls als gelöst zu betrachten ist. Diese Situation wird durch aktuelle Entwicklungen noch verschärft:

- Alterung von Material und Komponenten erhöht das Unfallrisiko
- Die angestrebten Lebensdauererstreckungen für Kernkraftwerke verschärfen die Alterungsproblematik und erhöhen inhärente Risiken.
- Infolge ihrer Stagnation erleidet die Nuklearindustrie Mangel an geschultem Personal, Verlust Technischer Support-Organisationen, zunehmender Verknappung nukleartauglicher Ersatzteile, etc., d.h. an all jenem, an dem infolge der Alterung sogar erhöhter Bedarf besteht.
- Die Liberalisierung des Strommarktes verschärft Wettbewerb und erhöht Kostendruck. Das gibt Anlass zu Befürchtungen, dass dies zu Lasten von Investitionen in die Sicherheit geht. Aktuelle Beispiele sind Abbau technischer Mitarbeiter und Zunahme von Inspektionsintervallen.
- Die Minderung der Anforderungen in IAEA Richtlinien und nationalen Standards und Vorschriften kann am Beispiel der Sprödbriechanalyse für WWER Reaktoren durch Vergleich der Sicherheitsfaktoren in der früheren (1997) und in der jetzigen (2006) IAEA Richtlinie nachverfolgt werden. Die entschärften Richtlinien wurden in die tschechische Gesetzgebung übernommen; nach den alten Bestimmungen wäre der Nachweis der strukturellen Integrität des Reaktor-druckbehälters von Temelin über die gesamte projektierte Lebenszeit nicht möglich gewesen. In anderen Fällen werden Standards und Vorschriften durch sogenannte „Expert Judgements“ außer Kraft gesetzt, eine heikle Angelegenheit angesichts der geringen Zahl von Nuklearexperten, die zum Großteil von der Nuklearindustrie abhängig sind.
- Viele Kernkraftwerke unterliegen einem größeren seismischen Risiko als ursprünglich angenommen. Neue Untersuchungsmethoden, die bereits in die IAEA Empfehlungen Eingang gefunden haben, werden in der Praxis noch nicht von allen Aufsichtsbehörden eingefordert.
- Die bei der Genehmigung der Anlagen getroffenen spezifischen Annahmen über wetterbeeinflusste externe Gefahren müssen angesichts des beobachteten und noch zu erwartenden Klimawandels überprüft werden.
- Eine wahrscheinliche Folge wachsender Weltbevölkerung, schwindender natürlichen Ressourcen und zunehmender ungerechter Verteilung ist erhöhte soziale und politische Instabilität. Kernkraftwerke stellen attraktive Ziele für Sabotage, Terrorangriffe und bewaffnete Konflikte dar und können praktisch nicht verlässlich geschützt werden. Das könnte mit Zunahme der Anzahl von Konflikten - vermehrt auf dem Gebiet industrialisierter Staaten ausgetragen – zu einem ernstem Problem werden.

Katastrophen sind komplexen und gekoppelten Systemen inherent und daher unvermeidbar [Perrow 1999], wiewohl die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens durch geeignete Sicherheits-

maßnahmen reduziert werden kann. Kernenergieerzeugung erfordert sehr komplexe und gekoppelte Systeme mit anspruchsvollen Sicherheitskonzepten, wie etwa Diversität, Redundanz und Mehr-Barrieren-System (defense-in-depth). Letztere tragen aber auch selber zur Erhöhung der Verletzlichkeit bei [e.g. Sagan 2004]; es geht also um ein schwieriges, nicht befriedigend lösbares Optimierungsproblem. Enorme Energien, auf kleinem Raum konzentriert, zusammen mit gefährlichen Substanzen in Mengen, die zur Kontamination großer Gebiete mit persistentem radioaktiven Material ausreichen, können grundsätzlich weder hinreichend sicher eingeschlossen werden, noch in ihrer Handhabung gegen den menschlichen Faktor sicher gemacht werden. Aufgrund zwingender physikalischer Gesetze können unfallauslösende Kausalketten durch physische Einschlüsse und technische Strukturen nie vollständig beseitigt werden, noch können die evolutionären biologischen Beschränkungen der menschlichen Natur durch administrative, rechtliche oder psychologische Sicherheitsmaßnahmen aufgehoben werden.

3.9 Literatur

Adamov, E.O. (1999): Supply of Fuel for Nuclear Power – Present Situation and Perspectives, The Uranium Institute 24th Annual Symposium, 8-10 September 1999: London, © Uranium Institute 1999

AEAT (2001): AEA Technology plc, et al., Main Characteristics of Nuclear Power Plants in the European Union and Candidate Countries, EUR-20056-EN, prepared for the European Commission (Luxembourg), October 2001
[http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/publications/synopses_en.htm#20055]

Austrian Expert Team (2001): Austrian Technical Position Paper on Safety Aspects of Temelín Nuclear Power Plant. Expert Mission with trilateral participation according to chapter IV of the PROTOCOL of the negotiations between the Czech and the Austrian Government. July 2001
[<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/kernenergie/akw/temelin/etemelk/etetriolog/>]

Batishchev, M., I. Hinovsky, W. Kromp, N.Meyer, I. Tweer, G. Weimann and H. Wüstenberg (2005): ETE Roadmap. Item 3. Reactor Pressure Vessel Integrity and Pressurized Thermal Shock. Final Monitoring Report. Report to the Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Watermanagement of Austria. Federal Environment Agency Ltd Vienna, June 2005 ISBN 3-85457-792-3
[www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/kernenergie/akw/temelin/roadmap]

BMWi Arbeitsgruppe (2000): Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung in Deutschland, Bericht der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) berufenen Arbeitsgruppe, 21. Januar 2000

BNSA (2006): Bulgarian Nuclear Regulatory Agency (BNSA), Kozloduy NPP unit 5 shut down on 1 March 2006, News Release, 15 March 2006
[<http://www.bnsa.bas.bg/news/060314.html>]

Bouthoul G. (1972): Kindermord aus Staatsraison. Deutsche Verlags-Anstalt GmbH Stuttgart, 1972

Bruns, J. (2004): Fachsitzung „Mitarbeiter und Kernkraftwerke“, Jahrestagung Kerntechnik 2004

Bulgaria (2004): Republic of Bulgaria, National Report on Fulfillment of the Obligations on the Convention on Nuclear Safety, Third Edition (Sofia), September 2004
[http://www.bnsa.bas.bg/documents/reports/en/CNS_III_Bulgaria.pdf]

Carter Center (1995): The Carter Center: State of World Conflict Report; The Carter Center, Atlanta, Georgia, 1995

Chernobyl Forum (2005): Chernobyl Forum, Chernobyl: The True Scale of the Accident, joint press release of the International Atomic Energy Agency, the World Health Organization, and the UN Development Programme, 5 September 2005
[<http://www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/pdfs/pr.pdf>]

CNS Bericht Schwedens (1998): Sweden's First National Report under the Convention of Nuclear Safety, 1998

CSN (2004): Consejo Seguridad Nuclear (CSN), España, Spain: Convention on Nuclear Safety, Third National Report, September 2004
[<http://www.csn.es/descarga/infnac3ing.pdf>]

EC (1993): Commission of the European Communities, Nuclear Safety in the Context of the Electricity Sector in Central and Eastern Europe and in the CIS, COM(93) 635 final, Brussels, 9. Dec. 1993

EC (2003/2004): Proposal and Amended Proposal for a „Council Directive (Euratom) laying down basic obligations and general principles on the safety of nuclear installations“ and Proposal and Amended Proposal for a „Council Directive (Euratom) on the safe management of the spent nuclear fuel and radioactive waste“, [COM(2003)32], [COM(2004)526]

ECN (2005): ECN & NRG, Kerncentrale Borssele na 2013: Gevolgen van beëindiging of voortzetting van de bedrijfsvoering, ECN-C-05-094, NRG 21264/05.69766/C, prepared for VROM, November 2005
[<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05094.pdf>]

Elbaradei, M. (1999): Statement to the General Conference, General Director, IAEA, Vienna, 27 September 1999
[<http://www.iaea.org/worldatom/Press/Statements/1999/ebsp1999n010.shtml>]

EPRI (2002): Electric Power Research Institute, Deterring Terrorism: Aircraft Crash Impact Analyses Demonstrate Nuclear Power Plant's Structural Strength, December 2002
[<http://www.nei.org/documents/EPRINuclearPlantStructuralStudy200212.pdf>]

ERI (2002): Energy Resources, Inc. (ERI), Sandia National Laboratories, and Oak Ridge National Laboratories, Perspectives on Reactor Safety, prepared for the US Nuclear Regulatory Commission, Technical Training Center, NUREG/CR-6042, Rev. 2 (Rockville, MD USA), March 2002

Gabko, P. and Z. Kovács (2004): „Implementation of the Integrated Level 2 Full Power and Shutdown PSA Model of the J. Bohunice V1 NPP in EOOS Risk Monitor“, presented at the Electric Power Research Institute R&R Workstation 2004 Annual User Group Meeting (Juno Beach, Florida), 12-16 January 2004
[[http://www.epri.com/r&rworkstation/UserGroup/04Jan/meetingmaterials/29\)\(Bohunice\)-V1EOOS.pdf](http://www.epri.com/r&rworkstation/UserGroup/04Jan/meetingmaterials/29)(Bohunice)-V1EOOS.pdf)]

GAO (2000): United States General Accounting Offices (GAO), “Nuclear Safety: Concerns With the Continuing Operation of Soviet-Designed Nuclear Power Reactors”, Report to the Subcommittee on Energy and Water Development, Committee on Appropriations, House of Representatives, April 2000, p. 17

Govaerts, P. and B. De Boeck (1998): Current issues in safety regulations, conference TOP SAFE 98, AVNuclear (Brussels)

Guerrini, B. and S. Paci (1999): Appunti di impianti nucleari, Parte II A: Filiere, Anno Accademico 1998/1999, University of Pisa internal document No RL 811 A (99)

HAEA (2004): Hungarian Atomic Energy Authority (HAEA), Republic of Hungary National Report: Document Prepared in the Framework of the Convention on Nuclear Safety, Third Report (Budapest), 2004 [[http://www.oah.hu/web/portal.nsf/download/B8C9450F8EC4122CC1256F0F00324BCE/\\$File/3rd_natrep_hu.pdf?OpenElement](http://www.oah.hu/web/portal.nsf/download/B8C9450F8EC4122CC1256F0F00324BCE/$File/3rd_natrep_hu.pdf?OpenElement)]

Heinsohn, G. (2003): Söhne und Weltmacht. Terror im Aufstieg und Fall der Nationen. Orell Füssli Verlag AG, Zürich

HSE (2004): Health and Safety Executive, The United Kingdom's Third National Report on Compliance with the Convention on Nuclear Safety Obligations, Revision 3, September 2004 [<http://www.hse.gov.uk/nuclear/cn3.pdf>]

HSK (1996): Hauptabteilung für Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Gutachten zum Gesuch des Kernkraftwerks Leibstadt um Leistungserhöhung auf 3600 MWth, HSK 12/420 (Würenlingen), März 1996

HSK (1999): Hauptabteilung für Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Periodische Sicherheitsüberprüfung für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken, HSK 17/400 (Würenlingen), November 1999

HSK (2002): Hauptabteilung für Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Sicherheitstechnische Stellungnahme zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung des Kernkraftwerks Mühleberg, HSK 11/800 (Würenlingen), Dezember 2002

HSK (2004): Hauptabteilung für Sicherheit der Kernanlagen (HSK), KKW Beznau I: Sicherheitstechnische Stellungnahme der HSK zur Periodischen Sicherheitsüberprüfung, HSK 14/816 (Würenlingen), November 2004

Hughart, J. L. (2000): Chemical Hazards During the Recent War in Croatia, ATSDR, U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, 2002 [<http://www.atsdr.cdc.gov/OFP/terrorism/croatia.html>]

IAEA (1997): Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants, IAEA-EBP-WWER-08, IAEA Vienna 1997

IAEA (1998): International Atomic Energy Agency (IAEA), Upgrading of Fire Safety in Nuclear Power Plants: Proceedings of an International Symposium Held in Vienna, 18-21 November 1997, IAEA-TECDOC-1014 (Vienna), April 1998 [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1014_prn.pdf]

IAEA (1999): International Atomic Energy Agency (IAEA), Final Report on the Programme on the Safety of WWER and RBMK Nuclear Power Plants, IAEA-EBP-WWER-15 (Vienna), February 1999 [http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/wwer-rbmk/wwer_15.pdf]

IAEA (1999): International Atomic Energy Agency, General Conference, unofficial electronic version, GC(43)/INF/8, 31 August 1999 [<http://www.iaea.org/GC/gc43/documents/gc43inf8.html#gc43inf8sea>]

IAEA (2001): International Atomic Energy Agency (IAEA), The International Nuclear Event Scale (INES) User's Manual: 2001 Edition, IAEA-INES-2001, jointly prepared by IAEA and the OECD Nuclear Energy Agency (Vienna), February 2001

[<http://www-news.iaea.org/news/inesmanual/INES2001.pdf>]

IAEA (2002): International Atomic Energy Agency (IAEA), Heavy Water Reactors - Status and Projected Development, IAEA-TRS-407 (Vienna), May 2002

[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS407_scr/D407_start.pdf]

IAEA (2003): International Atomic Energy Agency (IAEA), Extreme External Events in the Design and Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1341 (Vienna), March 2003

[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1341_web.pdf]

IAEA (2004): International Atomic Energy Agency (IAEA), Experience Gained from Fires in Nuclear Power Plants: Lessons Learned, IAEA-TECDOC-1421 (Vienna), November 2004

[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1421_web.pdf]

IAEA (2005a): International Atomic Energy Agency (IAEA), Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group „Environment (EGE) (Vienna), August 2005

[http://www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/pdfs/ege_report.pdf]

IAEA (2005b): International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Safety Review for the Year 2004, IAEA/NSR/2004 (Vienna), August 2005

[<http://www.iaea.org/Publications/Reports/nsr2004.pdf>]

IAEA-2006: Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants, IAEA-EBP-WWER-08(Rev.1), IAEA Vienna, January 2006 IAEA Experts Meeting 1998: Report on Experts Meeting on Integrity and Brittle Fracture Safety Assurance of the Mochovce NPP RPV, IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 14-18. September, 1998 (Appendix 6.1)

IEA (1999): International Energy Agency (IEA), KEY WORLD ENERGY STATISTICS from the IEA, Edition 1999

INSAG (1991): International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG), Safety Culture, INSAG-4, International Atomic Energy Agency (Vienna), February 1991

[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub882_web.pdf]

INSAG (1992): International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG), The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, INSAG-7, International Atomic Energy Agency (Vienna), November 1992

[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub913e_web.pdf]

INSAG-12 (1999): International Nuclear Safety Advisory Group, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12, IAEA, Vienna, 1999

INSAG-14, 1999: International Nuclear Safety Advisory Group, Safe Management of the Operating Lifetimes of Nuclear Power Plants, INSAG-14 Report, IAEA, Vienna, 1999

INSAG-3 (1988): International Nuclear Safety Advisory Group, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, INSAG-3 Report, IAEA Safety Series No. 75, 1988

INSAG-8 (1995): International Nuclear Safety Advisory Group, A common basis for judging the safety of nuclear power plants built to earlier standards, INSAG Series No 8, IAEA, Vienna, 1995

IPCC (2001a): Climate Change 2001. Synthesis Report. Cambridge University Press 2001 und

IPCC (2001b): Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001. Third Assessment Report. Working Group I

IRR (2004): Institute of Risk Research (IRR), Comparison of a Tokamak Fusion Power Plant with Possible Nuclear Fission and Nuclear Fusion Competitors in 2050, SERF-3 Report, Task TW1-TRE/DFCA, University of Vienna (Vienna), October 2004

Jensen, S.E. and E. Nonbøl (1999): Description of the Magnox Type of Gas Cooled Reactor (MAGNOX), NKS-2, Risø National Laboratory (Roskilde, Denmark), 1999

Kemeny, J. et al. (1979), Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, President's Commission on the Accident at Three Mile Island (Washington, DC USA)

Kemeny, J.G. (1980): The President's Commission on the Accident at Three Mile Island, The Need for Change: The Legacy of TMI, 1980
[http://www.threemileisland.org/resource/item_detail.php?item_id=00000138]

Kopchinsky, G. (1997): Situation and Problems in the Power Generating Industry in Ukraine (Kiev, Ukraine), October 1997

Hofer, P., W. Kromp, N. Meyer, E. Seidelberger and I. Tweer (2001): Walkdown II Follow-up: Integrität des Reaktordruckbehälters im KKW Mochovce 1: Absicherung der Ergebnisse des Walkdown II und unterstützende Begleitung der IAEA-Untersuchung, Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Risk Research Report 34. Universität Wien. Dezember 2001

Latif, M. (2004): Simulationen zum globalen Klimawandel, 4. Annaberger Klimatage 2004, 12./13. Mai 2004

Magne, L. and C. Shepherd (2003): Status of Probabilistic Safety Assessment Methodology and Applications in Europe, 2nd International ILK (Internationale Länderkommission Kerntechnik) Symposium (München), 28-29 October 2003
[http://www.ilc-online.org/download/symposium2003/11_Magne-Shepherd.pdf]

Meserve, R. (2006): Nuclear Safety: Impressive & Worrying Trends, IAEA Bulletin 47:2, March 2006
[http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull472/pdfs/nuclear_safety.pdf]

MIT (2003): Massachusetts Institute of Technology (MIT), The Future of Nuclear Power (Cambridge, MA USA), July 2003
[<http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-full.pdf>]

Mlady, O. (1999): NPP Temelin Safety Analysis Reports and PSA Status, International Conference on the Strengthening of Nuclear Safety in Eastern Europe, Vienna 14-18 June 1999, Austria, p. 235-259

MuRe (2001): Winterstürme in Europa (II), Münchner Rückversicherung 2001

NE (1998): Nuclear Engineering International Vol. 43 No 529 August 1998

NE (2000): Nuclear Engineering International Vol. 45 No 547 February 2000

NE (2002): Nuclear Engineering International Vol. 47 No 576 July 2002

NE (2004): Nuclear Engineering International Vol. 49 No 599 June 2004

NEA (1996): OECD Proceedings, NEA, Infrastructure for Nuclear Energy Deployment, proceedings to the workshop in Paris, France 1996

NEI (1997): Nuclear Energy Institute, Source Book Soviet-Designed Nuclear Power Plants in Russia, Ukraine, Lithuania, Armenia, the Czech Republic, the Slovak Republic, Hungary and Bulgaria, Fifth Edition (Washington, DC USA), 1997

Nonbøl, E. (1996): Description of the Advanced Gas Cooled Type of Reactor (AGR), NKS/RAK2(96)TR-C2, Risø National Laboratory (Roskilde, Denmark), November 1996

NRC ((2002): US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Davis-Besse Reactor Vessel Head Degradation Lessons-Learned Task Force Report (Rockville, MD USA), 30 September 2002
[<http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/vessel-head-degradation/lessons-learned/lessons-learned-files/lltf-rpt-ml022760172.pdf>]

NRC (1987): US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Shutdown Order Issued Because Licensed Operators Asleep While on Duty, Information Notice Nr. 87-21 (Washington, DC USA), 11 May 1987
[<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/gen-comm/info-notices/1987/in87021.html>]

NRC (1992): US Nuclear Regulatory Commission (NRC), NRC Region I Augmented Inspection Team (AIT) Review of the November 9, 1991 Salem Unit 2 Turbine-Generator Overspeed and Fire Event, NRC Docket Nr. 50-311, 07 January 1992

NRC (1993): U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC): Status Report from NRC Incident Investigating Team; NRC, Washington, DC, February 10, 1993

NRC (1997): <http://www.nrc.gov/NRC/NUREGS/SR1603/index.html>

NRC (2003): US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Regulatory Effectiveness of the Anticipated Transient Without Scram Rule, NUREG1780 (Rockville, MD USA), September 2001
[<http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/doccontent.dll?ID=032810194:&LogonId=4b01c6898110eb138ba19bd2ea60f796>]

NRC (2004): US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Note to Editors: NRC Issues Preliminary Risk Analysis of the Combined Safety Issues at Davis-Besse, NRC News Release Nr. 04-117 (Rockville, MD USA), 20 September 2004

[<http://adamswebsearch.nrc.gov/idmws/ViewDocByAccession.asp?AccessionNumber=ML042640170>]

NW (1994): Ignalina Sabotage Deadline Passes Without Blow-Up, Bomb Not Found; newsletter article, Nucleonics Week, Washington, DC, November 17, 1994

NW (1995): U.S. Intelligence Warns Against Chechnyan Attacks on Reactors, newsletter article, Nucleonics Week, Washington, DC, December 22, 1995

OPB-88 (1988): OPB-88 General Provisions for Ensuring Safety of NPPs, PNAE-G-1-011-89, Moscow 1989 (in Russian)

Perrow, Ch. (1999): Normal Accidents. Living with High Risk Technologies. Princeton: University Press, 1999

POST (2004): Parliamentary Office of Science and Technology (POST), Assessing the Risk of Terrorist Attacks on Nuclear Facilities, Report 222 (London), July 2004

[<http://www.parliament.uk/documents/upload/POSTpr222.pdf>]

Reactor Harmonization Working Group RHWG (Harmonization of Reactor Safety on WENRA Countries)

Renn, O. and A. Klinke (1998): Management and Policy: Political Strategies and Instruments Of the Risk Types, SRA conference 1998, Paris

Rogovin, M. (1980): Three Mile Island: A Report to the Commissioners and to the Public, Special Inquiry Group, US Nuclear Regulatory Commission, Vols. I & II, 1980

[Vol. I, http://www.threemileisland.org/resource/item_detail.php?item_id=00000150; Vol. II, Pt. 1, http://www.threemileisland.org/resource/item_detail.php?item_id=00000151; Vol. II, Pt. 2, http://www.threemileisland.org/resource/item_detail.php?item_id=00000152; Vol. II, Pt. 3, http://www.threemileisland.org/resource/item_detail.php?item_id=00000153]

Rolevich, I. et al. (1996): Report for Belarus, One Decade After Chernobyl, Summing up the consequences of the accident, IAEA, Vienna, 1996

Romania (2004): Government of Romania, Convention on Nuclear Safety: Romanian National Report, Second Revision, August 2004

Sagan, S. (2004): Sagan Scott D., The Problem of Redundancy Problem: Why More Nuclear Security Forces May Produce Less Nuclear Security; Risk Analysis, Vol. 24, No 4, 2004

Schwartz, P. (2003): Environmental News Network, Thursday, September 11, 2003

[http://www.enn.com/news/2003-09-11/s_8086.asp]

Scranton, W. et al. (1980): Report of the Governor's Commission on Three Mile Island, 1980

[http://www.threemileisland.org/resource/item_detail.php?item_id=00000149]

Sholly, St., A. Gazsó, P. Hofer, W. Kromp and H. Kromp-Kolb (2000): "Integrated Risk Assessment", 3rd International Conference of the European Society for Ecological Economics ESEE 2000, Vienna 2000

SKI (2003): Statens Kärnkraftinspektion (SKI), The Tolerance of Swedish Nuclear Power Plants to Stress from External Sources, SKI PM 03:15, 2003

Slovak (2004): Slovak Republic, National Report of the Slovak Republic Compiled in Terms of the Convention on Nuclear Safety, September 2004
[http://www.ujd.gov.sk/NS_SR_2004_angl.doc]

Slovenian CNS (1998): National report on the fulfilment of the obligations of the convention on nuclear safety, the first Slovenian report in accordance with article 5, Ljubljana, August 1998

Steinberg/ Shteynberg N. A. et al. (1991): Causes and Circumstances of the Accident at Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant on 26. April 1986, Report by a Commission to the USSR State Committee for the Supervision of Safety in Industry and Nuclear Power, Moscow, 1991

STUK (2000): Säteilyturvakeskus (STUK), Experiences from the LNPP-P&DSA Review: Lessons Learned from RBMK Safety Studies, STUK-YTO-TR-168 (Helsinki), September 2000
[<http://www.stuk.fi/julkaisut/tr/stuk-yto-tr168.pdf>]

STUK (2004): Säteilyturvakeskus (STUK), Finnish Report on Nuclear Safety: Finnish 3rd National Report as Referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety, STUK-B-YTO 234 (Helsinki), September 2004
[<http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-b/stuk-b-yto234.pdf>]

Swiss Re (2000): Sturm über Europa. Ein Unterschätztes Risiko. Swiss Re Publishing, Zürich

Tobita, Y., H. Yamano, I. Sato (2006): Analytical Study on the Elimination of Severe Recriticalities in Large Scale LMFBRs with Enhancement of Fuel Discharge. Technical Meeting on Severe Accident and Accident Management Toranomon Pastoral, Minato-ku, Tokyo, Japan, March 14-16, 2006

Thomas, St. (1999): Economic and safety pressures on nuclear power: a comparison of Russia and Ukraine since the break-up of the Soviet Union, Energy Policy 27(1999), 745-767

Thompson, G. (1996): War, Terrorism and Nuclear Power Plants; Institute for Resource and Security Studies/Greenpeace International, London, March 1996

Uspuras, E. (1999): Status of Ignalina's Safety Analysis Reports, presented at the International Conference on the Strengthening of Nuclear Safety in Eastern Europe (Vienna), 14-18 June 1999
[http://www.lei.lt/insc/plants/ISAR_PAP.htm]

Volterra, E. (1988): Operating Experience With the Latina MAGNOX Reactor, in Technical Committee Meeting on Design Requirements, Operation and Maintenance of Gas-Cooled Reactors, IWGGCR-19, International Atomic Energy Agency (Vienna), 1988
[http://www.iaea.org/programmes/inis/aws/htgr/fulltext/iwggcr19_17.pdf]

Wiss. Beirat. (1998): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Globale Umweltveränderungen
Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken, Jahresgutachten 1998

Zittel, W. and J. Schindler (2006): Uranium Resources and Nuclear Energy. Background Paper
prepared by the Energy Watch group. EWG-Series No 1/2006

4 Radioaktive Abfälle

Helmut Hirsch

Juni 2005, geringfügige Aktualisierung September 2006

Inhaltsverzeichnis

4	Radioaktive Abfälle	104
4.1	Einführung	104
4.2	Transport, Zwischenlagerung und Wiederaufarbeitung	104
4.3	Endlagerung radioaktiver Abfälle	106
4.3.1	Das Gefährdungspotential der Abfälle	106
4.3.2	Optionen für die Endlagerung und ihre Bewertung	107
4.3.2.1	Geologische Endlagerung	107
4.3.2.2	Rückholbarkeit bei der geologischen Endlagerung	109
4.3.2.3	Kontrollierte Lagerung an oder nahe der Oberfläche	111
4.3.2.4	Abtrennung und Transmutation	112
4.4	Die internationale Entwicklung in den letzten Jahren	113
4.5	Fazit	115
4.6	Literaturhinweise	116

4 Radioaktive Abfälle

4.1 Einführung

Radioaktive Abfälle aus der zivilen Nutzung der Atomenergie stellen über sehr lange Zeiträume eine Gefahr dar. Ihre Radiotoxizität ist vor allem auf Nuklide zurückzuführen, die in der Natur nicht oder nur in Spuren auftreten (beispielsweise Plutonium-Isotope, Neptunium-237).

Die Mengen an radioaktiven Abfällen nehmen zurzeit kontinuierlich zu. Die Atomkraftwerke der Welt produzieren pro Jahr etwa 10.000 Tonnen hochradioaktiver, abgebrannter Brennelemente.

Daneben entstehen bei der zivilen Nutzung der Atomenergie zahlreiche andere Ströme radioaktiver Abfälle. Der Löwenanteil der Radionuklide ist dabei im abgebrannten Brennstoff enthalten. Auch andere Abfallarten können problematisch sein.

Die größten Abfallmengen entstehen beim Abbau und den ersten Verarbeitungsschritten des Urans. Beispielsweise wurden bei Wismut in der ehemaligen DDR bis 1989 95.000 t Uran-Konzentrat (Yellow Cake) gewonnen. Dafür mussten 124 Millionen Tonnen Erz abgebaut werden [Lowson und Brown 1995]. Dies entspricht einer Menge von 1.300 t Erz pro Tonne Uran-Konzentrat, bzw. ca. 10.000 t Erz pro Tonne Brennstoff für Leichtwasserreaktoren.

Weitere Abfälle entstehen bei der Anreicherung, Brennelemente-Fertigung, als Sekundärabfälle beim Betrieb der Reaktoren, in relativ geringen Mengen bei der Lagerung von Brennstoff und in großen Mengen bei der Wiederaufarbeitung. Auch radioaktive Abfälle, die bei der unmittelbar Atomenergie-bezogenen Forschung und Entwicklung entstehen, sind zu erwähnen (z.B. aus dem Betrieb von Materialtest-Reaktoren oder Versuchsanlagen zu Abfallbehandlung).

Da der Großteil der Gesamt-Toxizität der radioaktiven Abfälle, wie erwähnt, auf die abgebrannten Brennelemente entfällt, stehen diese in den weiteren Ausführungen im Mittelpunkt.

4.2 Transport, Zwischenlagerung und Wiederaufarbeitung

Der Transport radioaktiver Abfälle, insbesondere von abgebrannten Brennelementen, ist mit erheblichen Gefahren verbunden.

Die eingesetzten Behälter sind zwar sehr widerstandsfähig, jedoch nicht völlig katastrophensicher. Bei schweren Unfällen beim Bahn-, Straßen- oder Schiffstransport können sie undicht werden, vor allem bei lang anhaltenden Bränden oder heftigen mechanischen Einwirkungen. Sie sind auch gegenüber Terror-Angriffen (z.B. Beschuss mit panzerbrechenden Waffen) verwundbar. Beträchtliche radioaktive Freisetzungen können die Folge sein. Bei ungünstigen Witterungsbedingungen kann noch in über 5 km Entfernung vom Unfallort Umsiedlung der Bevölkerung erforderlich sein [Deppe et al. 1992].

Weitere Gefahrenmomente sind mögliche radioaktive Kontaminationen an der Außenseite der Transportbehälter oder am Transportfahrzeug, die sich ablösen und durch Inhalation, Ingestion

oder Hautkontakt zur Strahlenbelastung von Menschen führen können. Auch die Direktstrahlung aus dem Behälter darf als Risikofaktor nicht vernachlässigt werden.

Bei der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle bestehen ebenfalls Sicherheitsprobleme.

Bei einer Lagerung mit Zwangskühlung, insbesondere in Wasserbecken, kann Kühlungsausfall zu schweren radioaktiven Freisetzungen führen. Das Inventar eines Lagerbeckens an langlebigen radioaktiven Stoffen kann das Mehrfache dessen sein, was ein Reaktor enthält. Bei vielen Kernkraftwerken (z.B. den meisten Anlagen in den USA, aber auch mehreren im EU-Raum) sind die Lagerbecken schlechter gegen Einwirkungen von Außen (somit auch Terror-Angriffe) geschützt als der Reaktor selbst, da sie sich außerhalb des Reaktorgebäudes, oder in einem Teil des Reaktorgebäudes befinden, der durch eine dünnwandigere Betonstruktur eingeschlossen ist als der Reaktor.

Bei dem zunehmend bevorzugten Verfahren der Trockenlagerung mit Naturzug können Einwirkungen von Außen schwere Unfälle auslösen. Die Lagerung in modifizierten Transportbehältern ist überdies mit dem Problem verbunden, die Dichtigkeit der Behälter und die spätere Hantierbarkeit des gelagerten Brennstoffes über lange Zeiträume zu garantieren.

Die Wiederaufarbeitung von abgebranntem Kernbrennstoff bedeutet die Abtrennung des überwiegenden Teils des Urans und Plutoniums, gleichzeitig aber die Verteilung der verbliebenen Nuklide über ein großes Abfallvolumen. Aus einer Tonne Brennstoff mit einem Volumen von rd. einem halben Kubikmeter entstehen in Sellafield und La Hague rund 10 Kubikmeter radioaktive Abfälle [COGEMA und BNFL 1990].

Außerdem ist die Wiederaufarbeitung störanfällig und mit einem hohen Gefahrenpotential verbunden, beispielsweise was die Lagerung flüssiger hochaktiver Abfälle in Tanks betrifft. Schon im Normalbetrieb ist sie mit nennenswerten radioaktiven Abgaben verbunden. Dementsprechend stellte die OSPAR Kommission auf ihrer Sitzung im Juni 2000 fest:

„... that nuclear reprocessing facilities in the North-East Atlantic area are the dominant sources of discharges, emissions and losses of radioactive substances and that implementing the non-reprocessing option for spent nuclear fuel would, therefore, produce substantial reductions of discharges, emissions and losses of radioactive substances into the North-East Atlantic...“

Die Kommission forderte eine Überprüfung der bestehenden Emissionen aus Wiederaufarbeitungsanlagen mit dem Ziel, u.a. die Option, nicht wiederaufzuarbeiten, zu implementieren und Maßnahmen zur Minimierung der Unfallrisiken zu treffen [OSPAR 2000].

Insgesamt sollen die radioaktiven Emissionen aus den beiden Wiederaufarbeitungsanlagen La Hague und Sellafield bis zum Jahr 2020 auf nahezu Null („close to zero“) reduziert werden. Im Juni 2003 legten die bei OSPAR mitwirkenden 15 Staaten, darunter auch Frankreich und Großbritannien, das Vorgehen genauer fest. Um eine Einigung zu erzielen, waren weitgehende Kompromisse erforderlich. Die Reduktionen bei den Emissionen werden nur sehr langsam erfolgen, und es sind Ausnahmeklauseln bei bestimmten Nukliden vorgesehen, um den Betreibern mehr Flexibilität zu gewährleisten. Insgesamt erscheint es zurzeit fraglich, ob das Ziel von „close to zero“ tatsächlich bis 2020 erreicht werden kann [Nuclear Fuel 2003].

4.3 Endlagerung radioaktiver Abfälle

4.3.1 Das Gefährdungspotential der Abfälle

Die radioaktiven Abfälle, die bei der zivilen Nutzung der Atomenergie entstehen, weisen ein außerordentliches Langzeit-Gefährdungspotential auf. Es kann über Millionen Jahre nicht vernachlässigt werden und ist in der Industriegesellschaft einzigartig.

Es ist festzuhalten, dass sich diese Aussage ausschließlich auf den kommerziellen Einsatz der Atomenergie bezieht. Sie trifft in dieser Form nicht notwendig auf Abfälle aus der Nutzung radioaktiver Stoffe in Medizin, Forschung und Industrie zu.

Einige Zahlen können diese einzigartige Langzeit-Gefährdung belegen: Dabei soll eine Menge von 400.000 t abgebrannten Kernbrennstoffs betrachtet werden, entsprechend dem Vierzigfachen der derzeitigen weltweiten Jahresproduktion von etwa 10.000 t [Fukada et al. 2003]. (Für Atomkraftwerke wird im Allgemeinen eine Gesamt-Betriebsdauer im Bereich von 40 Jahren angenommen.)

Zur Illustration der Gefährdung wird jene Wassermenge ermittelt, die erforderlich wäre, um diese Abfallmenge so zu verdünnen, dass bei ausschließlichem Verbrauch des Wassers als Trinkwasser die entsprechenden Grenzwerte eingehalten werden. (Die Einhaltung von Grenzwerten bedeutet nicht, dass keine Gesundheitsschäden zu befürchten wären.)

Bezugsgrundlage bei der Ermittlung der Wassermenge ist dabei die Euratom-Richtlinie 96/29. Die nationalen Vorschriften, die in der EU Gültigkeit haben, sind z.T. strenger als diese Richtlinie. Auf der Basis der deutschen Strahlenschutzverordnung beispielsweise würden erheblich größere Verdünnungsmengen resultieren.

Für zwei Zeitpunkte, 1000 bzw. 1 Million Jahre nach Einlagerung werden die entsprechenden Verdünnungsmengen für die beiden jeweils dominierenden Stoffe (Plutonium bzw. Neptunium) in Tabelle 4-1 angeführt. Die tatsächliche Radiotoxizität des Radionuklidgemisches ist insofern also jedenfalls höher als hier angegeben.

Tab. 4-1 **ERFORDERLICHE VERDÜNNUNGSMENGE FÜR AUSGEWÄHLTE NUKLIDE IN ABGEBRANNTEM KERNBRENNSTOFF**

Zeitpunkt	Nuklid	Verdünnungsmenge (Euratom)
Nach 1.000 Jahren	Plutonium (alpha)	3 Mio km ³
Nach 1 Million Jahren	Neptunium-237	1.500 km ³


lebensministerium.at

Zum Vergleich: Das Gesamtvolumen allen Grundwassers auf der Erde wird auf ca. 4 Millionen Kubik-Kilometer geschätzt. Der Atlantische Ozean umfasst ca. 350 Millionen Kubik-Kilometer, die Ostsee etwa 23.000 Kubik-Kilometer.

Von Interesse ist auch ein Vergleich mit chemotoxischen Abfällen. Auch hier soll zur Vereinfachung lediglich ein Stoff betrachtet werden – Cadmium, eines der giftigsten Schwermetalle. Um die gleiche Menge (400.000 Tonnen) Cadmium bis auf den Grenzwert der deutschen Trinkwasserordnung zu verdünnen, werden ca. 80.000 Kubik-Kilometer Wasser benötigt.

Daraus ergibt sich grob folgendes Bild: Für Zehntausende von Jahren ist die Toxizität radioaktiver Abfälle weitaus höher als jene chemotoxischer Abfälle und stellt, wie gesagt, ein einzigartiges Problem dar. Danach tritt eine Annäherung ein. Langfristig betrachtet, d.h. für Zeiträume ab einigen Hunderttausenden bis einer Million Jahre, unterscheidet sich eine Deponie radioaktiver Abfälle von der Toxizität her immer weniger von einer Schwermetall-Deponie. Dies gilt auch von der Art der eingelagerten Abfälle her gesehen (langfristige Dominanz von Uran und anderen auch chemotoxischen Metallen; außerdem können in einem Endlager auch nichtradioaktive Schwermetalle wie Blei aus Abschirmungen vorhanden sein).

Diese Betrachtung macht im Übrigen deutlich, dass auch die Endlagerung rein chemotoxischer Abfälle äußerst problematisch ist und das Aufkommen dieser Abfälle stark reduziert werden müsste.

4.3.2 Optionen für die Endlagerung und ihre Bewertung

Grundsätzlich bestehen drei verschiedene Optionen für die Endlagerung, wobei unter Endlagerung hier die Verbringung der Abfälle an einen Ort, mit der Absicht, sie ohne zeitliche Begrenzung dort zu belassen, verstanden wird:

1. Lagerung im tiefen geologischen Untergrund mit Kontrolle und Korrekturmöglichkeit allenfalls für einen sehr begrenzten Zeitraum (etwa 100 Jahre). Als Variante besteht hier auch die Option einer geologischen Tiefenlagerung mit der zumindest grundsätzlichen Möglichkeit einer späteren Rückholbarkeit.
2. Lagerung an bzw. nahe der Erdoberfläche mit zeitlich unbegrenzter Kontrolle und Korrekturmöglichkeit (Rückholbarkeit).
3. Abtrennung und Transmutation langlebiger Stoffe mit Begrenzung des Gefährdungszeitraumes auf höchstens 1000 Jahre; Lagerung für diesen Zeitraum.

Verschiedene, auch als „exotisch“ betrachtete Varianten lassen sich entweder einer der genannten Optionen zuordnen, wie beispielsweise die Lagerung im Meeresboden, im arktischen Eis oder in sehr tiefen Bohrlöchern zu der ersten (geologische Endlagerung), oder sind als relativ weit hergeholt einzustufen wie die Pläne, radioaktive Abfälle ins Weltall zu schießen.

4.3.2.1 Geologische Endlagerung

Die geologische Endlagerung ist die weltweit favorisierte Variante, die auch in den meisten EU-Staaten an erster Stelle steht.

Das Hauptproblem dieser Option besteht darin, dass es nicht möglich ist, einen belastbaren Sicherheitsnachweis für die erforderlichen langen Zeiträume (Millionen von Jahren) zu führen. Die Naturwissenschaft stößt hier an die Grenzen ihrer Vorhersagefähigkeit.

In diesem Punkt besteht ein weitgehender Konsens bei allen beteiligten Wissenschaftlern.

„Wegen der langen zu betrachtenden Zeiträume kann weder die Richtigkeit der Beweisführung belegt noch eine Fehleinschätzung korrigiert werden.“ [Endlager-Hearing 1998]

„Wenn auch die für die Sicherheitsanalyse bedeutsamen Ereignisabläufe noch nicht alle im Detail aufgeklärt und verstanden, die Eingangsdaten für Modellrechnungen mit Unsicherheiten behaftet und folglich auch die zum Einsatz gelangenden Modelle noch nicht vollständig entwickelt sind, so herrscht international doch Einigkeit darüber, daß der Nachweis der Sicherheit eines Endlagers über einen Zeitraum bis zu 10.000 Jahren auf analytische Weise erbracht werden kann.“ [FZK 1998]

„Allerdings setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, daß eine Modellvalidierung [beim Nachweis der Langzeitsicherheit] im strengen Sinn nicht durchführbar ist.“ [FZK 1998]

„In the context of geological disposal, because of the long timescales involved, it is not possible to demonstrate safety directly and recourse must be made to other, less direct, evidence.“ [Pather 2005]

Schwierigkeiten bestehen schon dabei, eine geeignete Messlatte für die Langzeitsicherheit zu finden. Es kann in Frage gestellt werden, ob die durch Freisetzungen aus dem Endlager hervorgerufene maximale Individualdosis von Menschen als einziges bzw. zentrales Kriterium für die Sicherheit geeignet ist. Unter anderem wurde über zusätzliche Anforderungen zum Schutz der belebten Umwelt und der Umweltmedien, insbesondere des Grundwassers, diskutiert [Endlager-Hearing 1993]. Dieser Aspekt wurde allerdings in den letzten Jahren relativ wenig beachtet. Die neuesten Sicherheitsanforderungen (Safety Requirements) der IAEA für geologische Tiefenlagerung diskutieren zwar neben dem Schutz der menschlichen Gesundheit auch den Schutz der Umwelt, jedoch nur in eher marginaler Form [IAEA 2006].

Konkreter wird gefordert, den Gebrauch der Dosis als Kriterium auf eine rationalere Basis zu stellen und weitere Langzeit-Indikatoren für die Sicherheit zu definieren.

„... radiation doses are not assessable with any certainty for periods of time longer than a few hundred years ... we appear to be unable to find a suitable indicator to demonstrate the long-term safety of waste disposal ...“ [Gonzalez 1998]

In Detailfragen bestehen darüber hinaus noch zahlreiche ungelöste Probleme, die Langzeit-Vorhersagen weiter erschweren, beispielsweise im Hinblick auf die Entstehung von Gasen in einem geologischen Endlager und die Rolle von Kolloiden im Grundwasser beim Transport von Radionukliden:

„Die Beherrschbarkeit der Gasbildung in dichtem Salzgestein in Folge von Korrosion und Zersetzung der Abfälle stellt ein besonderes Problem dar.“ [Erklärung der Deutschen Bundesregierung 2000]

„Although the three projects [EU-Projekte HUMICS, CARESS und TRANCOM] have significantly improved our understanding of colloid facilitated radionuclide transport, further research is required if long-term predictions of the performance of a waste repository are to be made.“ [Warwick et al. 1999]

Ein 2004 erschienener Bericht der Kernenergieagentur (NEA) der OECD zur Sicherheit der geologischen Endlagerung in der Schweiz zeigt deutlich, dass es noch eine Unzahl von offenen Detailproblemen gibt [OECD 2004]. Es wurde empfohlen, Arbeiten zur Verringerung der bestehenden Ungewissheiten fortzuführen. Klärungsbedarf wird beispielsweise im Zusammenhang mit dem Verhalten des in der Schweiz vorgesehenen Verfüllmaterials (Bentonit) und dessen Wechselwirkung mit anderen Komponenten des Endlagers gesehen, sowie auch bei Fragen der geochemischen Rückhaltung, der Stichtätigkeit der Verwendung von natürlichen Analoga, der Diffusionsprozesse im Ton – kurz, bei zahlreichen Punkten, die für die Sicherheit der Endlagerung von großer Bedeutung sind. Weiterhin wird betont, dass die durch Modellierung ermittelten Dosisraten lediglich Indikatoren sind, aber nicht als Langzeitprognosen angesehen werden dürfen. Eine Bewertung der schweizerischen Endlagerpläne durch österreichische ExpertInnen stimmte den meisten Ergebnissen der NEA zu. Diese Bewertung kam auch zu dem Schluss, dass weitere entscheidende Fragen wie die möglichen Auswirkungen von Erosion durch Schmelzwasser in einer künftigen Eiszeit und die Homogenität der Tonformation, die als Wirtsgestein vorgesehen ist, der Klärung bedürfen [HIRSCH 2005]. Die in der Schweiz bisher durchgeführten Arbeiten wurden Mitte 2006 vom Schweizer Bundesrat als Entsorgungsnachweis akzeptiert [BFE 2006]. Die offenen Fragen bleiben allerdings bestehen.

Auf der internationalen Endlager-Tagung DisTec im April 2004 wurde weiterhin aus anderen Staaten über ungelöste Probleme der Endlagerung berichtet, beispielsweise aus Belgien, Frankreich und Deutschland [DisTec 2004]. Deutlich wurde dabei auch, dass eine umfassende Datenbasis zur Beschreibung der in einem Endlager im Salz (also in einem der bevorzugten Endlagermedien) ablaufenden Reaktionen bisher noch nicht existiert.

Auch ein vor wenigen Jahren erschienener technischer Bericht der IAEO zur geologischen Endlagerung listet in seiner Zusammenfassung 13 Bereiche auf, in denen noch Defizite bestehen und weitere Arbeit als erforderlich angesehen wird, um die wissenschaftliche und technische Basis der Endlagerung zu vergrößern [IAEA 2003]. Dies betrifft grundlegende Punkte wie beispielsweise Methoden zur Auswertung von Standortdaten, den Umgang mit Ungenauigkeiten und Unsicherheiten bei der Standortbewertung, Mechanismen von Radiolyse an Kanistern mit abgebranntem Brennstoff sowie Fragen des Gastransportes im geologischen Medium.

Es kann angesichts dieser Probleme und offenen Fragen nicht verwundern, dass es weltweit noch kein Endlager für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle aus der zivilen Nutzung der Atomenergie gibt.

4.3.2.2 Rückholbarkeit bei der geologischen Endlagerung

Die bei der geologischen Endlagerung bestehenden Unsicherheiten und der zunehmend als Nachteil empfundene Mangel an Kontrolle und Eingriffsmöglichkeiten bei der „klassischen“ Endlagerung spiegeln sich darin wider, dass mehr und mehr Staaten die Option der Rückholbarkeit untersuchen.

In der Zeit zwischen 1985 und 1999 haben fast alle EU-Staaten mit Atomprogrammen, sowie auch die Schweiz, begonnen, sich aktiv mit Rückholbarkeit zu beschäftigen [Vrijen 1999].

Dennoch wird immer noch die Forderung laut, die entsprechenden Untersuchungen zu intensivieren: „*Why isn't the option of retrievable disposal explored more carefully?*“ [Gonzalez 2004]

In den letzten Jahren hat sich der Trend zur Berücksichtigung der Rückholbarkeit eher noch verstärkt. In einem Land der EU, den Niederlanden, gilt die Forderung, dass radioaktive Abfälle – sofern sie überhaupt geologisch endgelagert werden – rückholbar gelagert werden müssen. Die Zeitdauer, für die dies als machbar erachtet wird, wird allerdings als „restricted to a maximum of a couple of hundred years“ angesehen [JC/NL 2006].

In Frankreich wird der Reversibilität (die ein ähnliches, aber weiter gehendes Konzept darstellt als die Rückholbarkeit) ebenfalls ein hoher Stellenwert zugeordnet. Die in Frankreich für Endlagerung zuständige Behörde ANDRA schätzt die Dauer der Reversibilität mit 200 bis 300 Jahren ab. [JC/FRA 2006]. In dem neuen französischen Gesetz zur Endlagerung, das im Juni 2006 verabschiedet wurde, wird Reversibilität für mindestens 100 Jahre gefordert [Nuclear Fuel 2006b].

Dabei sind einer gezielten Anwendung und dem Nutzen der Rückholbarkeit bei der geologischen Tief Lagerung zur Erhöhung der Sicherheit enge Grenzen gesetzt.

Rückholung der Abfälle ist bei einem geologischen Endlagerbergwerk, das sich typischerweise in einer Tiefe von einigen hundert bis tausend Metern befindet, prinzipiell immer möglich, solange dessen Ort bekannt ist und der dabei betriebene Aufwand keine Rolle spielt.

Das Problem besteht darin, dass bei einem verfüllten Endlagerbergwerk keine Informationen über den Zustand des Endlagers und seiner Umgebung mehr zugänglich sind. Es ist daher nicht möglich, die Abfälle gezielt und rechtzeitig zurückzuholen, sobald unvorhergesehene Abläufe eingetreten sind, die die Sicherheit beeinträchtigen.

Eine Rückholung zu einem Zeitpunkt, zu dem bereits Radionuklide im oberflächennahen Grundwasser nachgewiesen wurden, eine Ausbreitung also bereits für Jahrhunderte oder Jahrtausende stattgefunden hat, erscheint kaum mehr zielführend.

Weiterhin wird jeder Versuch einer Rückholung dadurch erschwert, dass nicht bekannt ist, welche Verhältnisse in der Tiefe zu erwarten sind.

Dieses grundsätzliche Problem kann auch durch eine „rückholungsfreundliche“ Auslegung des Bergwerkes nicht beseitigt werden.

Maßnahmen wie Verrohrung von Bohrlöchern, in denen radioaktive Abfälle eingelagert sind, oder Färbung des Versatzes, um das Wieder-Auffinden zu erleichtern, sind nicht prohibitiv teuer und werden die Sicherheit des Endlagers nicht negativ beeinflussen, ändern aber nichts an dem Mangel an Informationen über den Zustand des Endlagers. Verlorene Sensoren, mit denen Temperatur, Spannung, Feuchtigkeit u.ä. im Bereich des Endlagers überwacht werden könnten, sind in ihrer Lebensdauer zu begrenzt, um auch nur über mehrere Jahrhunderte belastbare Informationen zu liefern.

Eine andere Möglichkeit wäre es, das Endlagerbergwerk oder Teile desselben geöffnet zu lassen, um den Zugang zu den Abfällen zu ermöglichen. Dies bringt jedoch zusätzliche Risiken mit sich, etwa eine erhöhte Gefahr des Absaufens der Grube, mögliche Probleme mit der Stabilität des Gesteins sowie die Gefahr, dass das Bergwerk schließlich ohne sachgerechte Verfüllung aufgegeben wird.

„Such implications could increase uncertainty in the initial conditions for the safety assessment by the long-term period.“ [Vrijen 1999]

Bei der Lagerung an oder nahe der Oberfläche ist Rückholbarkeit über lange Zeiträume gegeben. Diese Option unterscheidet sich grundlegend von der geologischen Endlagerung und wird getrennt behandelt.

4.3.2.3 Kontrollierte Lagerung an oder nahe der Oberfläche

Die kontrollierte Lagerung radioaktiver Abfälle als Endlagerung, d.h. mit unbegrenztem Zeithorizont (im Gegensatz zur zeitlich begrenzten Zwischenlagerung) wird innerhalb der „nuclear community“ nur in geringem Maße als Konzept vertreten.

In Frankreich wurde die Langzeitlagerung an der Oberfläche in dem Gesetz zur Endlagerung von 1991 als eine von mehreren möglichen Optionen, die untersucht werden sollen, ausgewählt [van den Berg and Damveld 2000]. Das neue Endlager-Gesetz von 2006 legt fest, dass eine Einrichtung zur Langzeitlagerung von langlebigen hochaktiven Abfällen bis 2015 errichtet werden soll. Im gleichen Jahr soll ein geologisches Endlager betriebsbereit sein [Nuclear Fuel 2006b]. Die geologische Tiefenlagerung stellt in Frankreich die bevorzugte Option dar. Die parallele Entwicklung der kontrollierten Langzeitlagerung zeigt aber deutlich, dass eine Reserve-Option als erforderlich angesehen wird.

In den Niederlanden legt der Regierungsbeschluss vom Mai 1993 fest, dass die Endlagerung radioaktiver Abfälle nach den Grundsätzen von „Isolation, Management und Kontrolle“ zu erfolgen hat [van den Berg and Damveld 2000]. Daher wird, wie oben erwähnt, im Falle der geologischen Endlagerung die Rückholbarkeit vorgeschrieben. Zurzeit ist jedoch konkret nur kontrollierte Lagerung an der Oberfläche geplant. Diese soll in Gebäuden zunächst für einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren erfolgen [JC/NL 2006].

Auch seitens verschiedener Nichtregierungsorganisationen (NGO), Umweltverbänden und -gruppen, sowie von universitärer Seite in Westeuropa und USA wird für kontrollierte Langzeitlagerung eingetreten, verbunden mit der Forderung nach Institutionalisierung entsprechender Langzeitüberwachung („Nuclear Guardianship“, [Macy 2005] sowie [Kromp und Lahodynsky 2006]). Dabei beschränken sich die Überlegungen nicht auf Gebäude an der Oberfläche. Verschiedene Anlagenkonzepte unter Tage, nahe der Oberfläche, sind vorstellbar, die auch einen gewissen Schutz gegen unbefugten Zugriff oder Naturereignisse bieten können.

Eine kontrollierte Lagerung über die erforderlichen Zeiträume kann jedoch letztlich auch nicht als realistische Perspektive erscheinen. So wie bei der geologischen Endlagerung die Naturwissenschaft an ihre prognostischen Grenzen stößt, scheitert die unbefristete kontrollierte Lagerung an der Unmöglichkeit, die gesellschaftliche Entwicklung auch nur über Jahrhunderte, geschweige denn Jahrtausende, vorherzusehen.

Erhebliche radioaktive Freisetzungen innerhalb kurzer Zeit sind bei allen Konzepten der Endlagerung denkbar, auch bei der geologischen Tiefenlagerung. Die Wahrscheinlichkeit für derartige Freisetzungen ist jedoch bei der Lagerung an oder nahe der Oberfläche sehr viel größer, da sich das gesamte radioaktive Inventar bereits inmitten bzw. jedenfalls nahe der Biosphäre befindet.

4.3.2.4 Abtrennung und Transmutation

Diese Option findet, ebenso wie die Rückholbarkeit, in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit.

Die Probleme, die mit ihrer großtechnischen Einführung verbunden wären, sind dabei zurzeit im Detail überhaupt nicht absehbar. Allerdings ist es mehr als wahrscheinlich, dass die zu erwartenden Probleme folgende Punkte einschließen würden: Potenzial für Unfälle, Umweltverschmutzung durch Wiederaufarbeitung, Proliferationsgefahren und sehr hohe Kosten [NAS 1996].

Erforderlich wäre eine praktisch vollständige Abtrennung sämtlicher langlebigen Nuklide, um sicherzustellen, dass die verbleibenden Abfälle nur für kurze Zeiträume sicher gelagert werden müssen. Die derzeit bei der Wiederaufarbeitung erreichten Abtrennungsgrade von ca. 99 % sind dafür bei weitem unzureichend.

Es müsste also eine Technik der „Super-Wiederaufarbeitung“ entwickelt werden (Abtrennung aller Aktiniden und langlebigen Spaltprodukte mit einer Effizienz von 99,99 % und mehr), die außerdem im Gegensatz zur jetzigen Praxis der Wiederaufarbeitung die Umwelt nicht belasten und kein Katastrophenpotential haben dürfte.

Weiterhin existieren die eigentlichen Transmutationsverfahren – sei es auf Basis von Neutronenquellen oder speziellen Reaktoren - heute praktisch erst im Labormaßstab.

Allgemein wird damit gerechnet, dass entsprechende Verfahren für Wiederaufarbeitung und Transmutation, wenn überhaupt, erst in mehreren Jahrzehnten zur Verfügung stehen [Kacsóh 1999]. Dies bedeutet u.a., dass sie auf keinen Fall eine Lösung für den bereits existierenden bzw. in der nächsten Zeit produzierten radioaktiven Abfall darstellen können.

Dies ist auch die Einschätzung der Experten, die auf der Konferenz „Euradwaste 1999“ der Europäischen Kommission an der Podiumsdiskussion über Abtrennung und Transmutation teilgenommen haben:

„It will require a few decades to install partitioning facilities capable of separating the most hazardous radionuclides from conventional reprocessing waste streams and to gradually introduce in an industrial power production reactor park fast neutron reactors or accelerator driven systems to transmute these radionuclides.

Once the installations for partition and transmutation have been introduced, the balances between the production and destruction of plutonium and of the hazardous radioanuclides will only be reached after several decades due to the long time span of the nuclear fuel cycle.

It is therefore necessary, and whatever the scenario, to have operational geological repositories to safely dispose of existing and future conditioned high level and medium level nuclear waste, which cannot be transmuted.“ [Warwick et al. 1999]

Die Experten des Podiums wiesen dementsprechend auch darauf hin, dass die Einführung von Abtrennung und Transmutation nur in Frage kommt, wenn Atomenergie über lange Zeiträume genutzt wird.

Festzuhalten ist aber auch, dass die Machbarkeit dieser Option aus heutiger Sicht grundsätzlich in Frage steht und somit offen ist, ob die Anstrengungen zu ihrer Entwicklung auch nach Aufwendung von Jahrzehnten und Milliarden von Euros überhaupt zum Erfolg führen.

„Solange jedoch nur Laborexperimente zur Machbarkeit der Transmutation durchgeführt werden – und hier steht die Forschung momentan –, kann das große theoretischen Potential dieser Technik nur mit gesunder Skepsis betrachtet werden.“ [Kacsóh 1999]

Diese Einschätzung wurde kürzlich durch einen Vertreter der Kernenergieagentur der OECD auf der Tagung DisTec 2004 bestätigt, der auf die noch offenen Fragen hinwies und außerdem betonte, auch nach Transmutation würde noch ein Endlager gebraucht, wenn auch für kleinere Abfallmengen [Shimomura 2004].

4.4 Die internationale Entwicklung in den letzten Jahren

Die internationale Entwicklung der letzten Jahre ist durch Rückschritte und Probleme in vielen Staaten gekennzeichnet.

In Deutschland ist es zu einem Stillstand bei der Endlagerung gekommen. Die frühere (rot/grüne) Bundesregierung ließ ein neues Verfahren zur Standortauswahl mit Öffentlichkeitsbeteiligung entwickeln, das ohne Vorentscheidungen mit einer „weißen Landkarte“ beginnen soll. Gleichzeitig wurden aber die alten, politisch umstrittenen und fachlich fragwürdigen, Projekte Gorleben und Konrad nicht aufgegeben. Das neue Verfahren wurde durch diesen Widerspruch, sowie auch den Widerstand der Abfallproduzenten (Kernkraftwerks-Betreiber) von Anfang an blockiert.

Der Bundesumweltminister der früheren Regierung hatte eine neue gesetzliche Regelung erwogen, mit der die Verantwortung für die Endlagerung vom Bund auf eine Körperschaft der Betreiber übergehen sollte. Der früheren Regierung gelang es jedoch nicht, die Endlagersuche aus ihrer Stagnation zu befreien [Nies 2004]. Seit dem Regierungswechsel in Deutschland im Jahr 2005 baut sich zunehmend Druck auf, das neue Verfahren zur Standortauswahl komplett zu verwerfen und zu den Projekten Konrad und Gorleben als einzigen Optionen zurückzukehren. Andererseits war es bisher das Konzept des derzeitigen Umweltministers, einen neuen Prozess der Standortsuche zu initiieren und neue Standorte mit Gorleben und Konrad zu vergleichen. Zurzeit (September 2006) ist die Frage des weiteren Vorgehens ungelöst.

In den USA halten sich fachliche Zweifel an dem Endlagerprojekt Yucca Mountain. In den letzten Jahren wurde in Frage gestellt, ob die Qualitätskontrolle bei den wissenschaftlichen Arbeiten zur Standortuntersuchung ausreichend war. Noch nicht ausreichend untersuchte Probleme betreffen u.a. die Möglichkeit des Eindringens von Grundwasser und die Auswirkung von Erdbeben.

Dazu kommt eine schwerwiegende Änderung in den grundlegenden Vorgaben für das Projekt. Im Juli 2004 hob der U.S. Appeals Court (Washington) den bisher für Yucca Mountain angenommenen Einschlusszeitraum von 10.000 Jahren auf und verlangte, in Anlehnung an eine Empfehlung der U.S. National Academy of Sciences, einen längeren Isolationszeitraum (bis zu 1 Million Jahre) [Platts 2004]. Als Reaktion haben die U.S. Environmental Protection Agency und die U.S. Nuclear Regulatory Commission beide Änderungen der Sicherheitsstandards vorgeschlagen. Diesen Vorschlägen zufolge soll sich der in Sicherheitsanalysen betrachtete Zeitraum bis zum

Zeitpunkt der maximalen Dosis erstrecken, aber jedenfalls nicht länger als eine Million Jahre. Für die ersten 10.000 Jahre soll der Grenzwert für Individuen bei 0,15 mSv/a liegen; für den Rest der betrachteten Zeit bei 3,5 mSv/a [NWTRB 2006]. Die letztere Zahl ist deutlich höher als der in den IAEA Sicherheitsanforderungen (Safety Requirements) gesetzte Wert von 0,3 mSv/a [IAEA 2006].

Im letzten Bericht des U.S. Nuclear Waste Technical Review Boards wird weiterhin darauf hingewiesen, dass weitere Arbeiten zu Rückhaltefähigkeit der natürlichen Barrieren erforderlich sind – Arbeiten, die Phänomene und Prozesse betreffen, die die Rate des Radionuklidtransportes deutlich beeinflussen können. Obwohl bereits sieben modellhafte Untersuchungen der Barrieren (performance assessments) durchgeführt wurden, gibt es beim grundsätzlichen Verständnis immer noch Lücken. Diese sollen durch konservatives Herangehen überbrückt werden. Es ist aber oft schwierig, zu beurteilen, wie konservativ ein Ansatz tatsächlich ist [NWTRB 2006]. Der Genehmigungsantrag für Yucca Mountain wird nun vorbereitet; viele offene Fragen bleiben.

In vielen Staaten, darunter auch Japan, wird die Endlagersuche neben fachlichen Problemen auch von mangelnder Akzeptanz der Bevölkerung behindert. In Finnland, das gelegentlich als positives Beispiel für Fortschritte bei der Endlagerung genannt wird, konnte ein Standort lediglich durchgesetzt werden, weil sich dieser direkt neben einem Kernkraftwerk befindet. In der betroffenen Region war über Jahrzehnte hindurch intensive Werbung für die Atomanlagen betrieben worden [Ryhänen 2004].

Das Inkrafttreten der Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management am 18. Juni 2001 stellt zweifellos einen Fortschritt bei der internationalen Entwicklung dar. Es handelt sich dabei um das erste Instrument, das Fragen der Endlagerung auf der internationalen Bühne regelt und Grundsätze im Hinblick auf den erforderlichen rechtlichen und aufsichtlichen Rahmen sowie zur Gewährleistung der Sicherheit festlegt.

Im Zusammenhang mit dieser Konvention bestehen jedoch noch deutliche Probleme. Zur Zeit der ersten Review Conference im November 2003 waren ihr wichtige Staaten wie beispielsweise Russland oder China noch nicht beigetreten. Außerdem merkte ein Vertreter der IAEO kritisch an, die Berichte und Diskussionen auf der ersten Überprüfungskonferenz im November 2003 hätten noch zu wünschen übrig gelassen. Bei der Berichterstattung wäre die wünschenswerte Offenheit nicht immer gegeben [Metcalf 2004].

Zum Zeitpunkt der zweiten Review Conference im Mai 2006 waren positive Entwicklungen zu verzeichnen. Es gab Fortschritte bei der Mitgliedschaft und, nach den Aussagen von Teilnehmern, eine Verbesserung der Qualität der nationalen Berichte. Die Joint Convention schließt nun, mit Ausnahme Indiens, sämtliche Staaten mit großen Atomprogrammen ein. Allerdings war es nicht möglich, auf der Conference einen Konsens über Sicherheitsstandards bei der Endlagerung zu erzielen. Bei diesem entscheidenden Thema wurde von Auseinandersetzungen mit „Zähnen und Klauen“ („tooth-and-nails“) berichtet. Während viele Länder den Empfehlungen der IAEO folgen, weigerten sich andere – insbesondere die USA –, IAEO-Dokumente als Standards oder Maßstab anzuerkennen [Nuclear Fuel 2006a].

Ein wichtiges Ergebnis der zweiten Review Conference war, dass die Suche und Festlegung von Standorten für Endlager, besonders für geologische Tiefenlager, weltweit auf große Schwierigkeiten stößt und nur geringe Fortschritte zu verzeichnen sind [JC 2006].

4.5 Fazit

Schon die „vorbereitenden“ Schritte beim Umgang mit radioaktiven Abfällen – Transport, Zwischenlagerung, Wiederaufarbeitung – führen zu erheblichen Umweltbelastungen und sind mit Unfallrisiken verbunden.

Die schwersten und in ihrer Art einzigartigen Probleme treten bei der Endlagerung auf.

Keine der Optionen für die Endlagerung erfüllt, soweit heute absehbar, die Forderungen nach Sicherheit und sozialer Verträglichkeit auch nur annähernd.

- Bei der Transmutation bestehen offene Fragen bezüglich der Sicherheit der damit verbundenen Wiederaufarbeitung sowie des Betriebes der erforderlichen Reaktor- bzw. Beschleunigersysteme. Hinzu kommen Zweifel an der grundsätzlichen Machbarkeit und auch der Bezahlbarkeit.
- Für die beiden anderen Optionen (geologische Tiefenlagerung und zeitlich unbefristete kontrollierte Lagerung an der Oberfläche) gilt: Aufgrund der langen Zeiträume, für die ein Sicherheitsnachweis zu führen wäre, erscheint es kaum denkbar, dass eine ausreichende Sicherheit garantiert werden kann.
- Bei der geologischen Endlagerung stößt die Naturwissenschaft an ihre prognostischen Grenzen, angesichts der Tatsache, dass Analysen viele Tausend, und sogar Millionen Jahre abdecken müssen. Bei der unbefristeten kontrollierten Lagerung an oder nahe der Oberfläche dagegen werden schon nach relativ kurzen Zeiträumen die Grenzen der Vorhersehbarkeit der gesellschaftlichen Entwicklung erreicht.

Daher ist die weitere Produktion von hochradioaktiven Abfällen nicht verantwortbar und sollte weltweit schnellstmöglich beendet werden.

Langfristig gesehen besteht eine Konvergenz der Problematik radioaktiver Abfälle mit jener toxischer Schwermetalle. In beiden Fällen ist das Gefährdungspotential auch nach Millionen Jahren noch sehr hoch. Das bedeutet, dass die Endlagerung chemotoxischer Abfälle ebenfalls äußerst problematisch ist und das Aufkommen dieser Abfälle stark reduziert werden muss.

Für die bereits vorhandenen radioaktiven Abfälle muss im gesellschaftlichen Konsens jene Lösung gefunden werden, die mit den geringsten Nachteilen verbunden ist. Der Ausstieg aus der Atomenergie begünstigt diese Minimierung der Nachteile. Die Begrenzung der produzierten Abfallmengen lässt u.U. Möglichkeiten noch zu, die bei einem weiteren andauernden Anwachsen der Volumina nicht mehr in Frage kommen (beispielsweise geologische Endlagerung in wenigen Bergwerken, die jeweils regional nach den günstigsten geologischen Verhältnissen ausgewählt werden, aber begrenzte Kapazität haben; oder grundsätzlich Konzepte, die bei größeren Mengen nicht mehr bezahlbar sind).

Die Begrenzung der Mengen verringert weiterhin den Zeitdruck, da jene Mengen, die transportiert und zwischengelagert werden müssen, geringer sind und somit auch die Risiken von Zwischenlagerung und Transport reduziert werden.

4.6 Literaturhinweise

BFE (2006): Entsorgung hochaktiver Abfälle in der Schweiz technisch machbar; Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie, press release of June 18, 2006-09-12

COGEMA und BNFL (1990): Siehe die Angaben zu den Abfallspezifikationen aus der Wiederaufarbeitung von COGEMA und BNFL, z. B. „Specifications des Déchets Technologiques Cimentés“ aus Zonen 2/3 und Zone 4, 2. Serie, COGEMA, Januar 1990

Damveld, H. and R.J. van den Berg: Nuclear Waste and Nuclear Ethics; Studie im Auftrag der Niederländischen Kommission für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (CORA), Groningen/Wageningen, Januar 2000

Deppe, U. et al. (1992): Transporte gefährlicher Güter auf dem Stadtgebiet von Hannover unter Berücksichtigung möglicher Gefahren und Auswirkungen durch radioaktive Stoffe; Landeshauptstadt Hannover, Amt für Umweltschutz, Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz Nr. 1/1992

DisTec (2004): Vorträge auf der Tagung DisTec 2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26-28, 2004 (insb. aus den Sektionen „Endlagerung hochaktiver Abfälle“, „Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle“ sowie „Sicherheit von Endlagern“)

Endlager-Hearing (1998): Endlager-Hearing des Niedersächsischen Umweltministeriums; Zusammenfassender Bericht der Arbeitsgruppe „Eignungsnachweis“, Braunschweig, 21.-23. September 1993

Erklärung der deutschen Bundesregierung (2000): Erklärung der deutschen Bundesregierung zur Erkundung des Salzstockes in Gorleben; Anlage 4 der „Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen“, 14. Juni 2000

Fukada, K. et al. (2003): IAEA Overview of global spent fuel storage; IAEA-CN-102/60, Vienna 2003

FZK (1998): Förderkonzept zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen (1997-2001); Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, April 1998

Gonzalez, A.J. (1998): The Future of Radioactive Waste Disposal; DisTec '98, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Hamburg, September 9-11, 1998, 19-29

Gonzalez, A.J. (2004): DisTec '98, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26-28, 2004

Hirsch, H. et al. (2005): Expertise zum Entsorgungsnachweis für ein Schweizer Endlager für abgebrannte Brennelemente, hochradioaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle – Mögliche Betroffenheit Österreichs; erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Wien, November 2005

IAEA (2003): International Atomic Energy Agency: Scientific and Technical Basis of the Geological Disposition of Radioactive Wastes; Technical Report Series No. 413, IAEA, Vienna, 2003

IAEA (2006): Geological Disposal of Radioactive Waste; Safety Requirements No. WS-R-4, jointly sponsored by International Atomic Energy Agency and OECD Nuclear Energy Agency, Vienna, May 2006

JC (2006): Summary Report – Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Second Review Meeting of the Contracting Parties, 15 to 24 May 2006, Vienna, Austria (JC/RM.2/03/Rev.1, 23 May 2006)

JC/FRA (2003): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, First Review Meeting, 3-14 November 2003 (National Report von Frankreich)

JC/NL (2003): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, First Review Meeting, 3-14 November 2003 (National Report der Niederlande)

Kacsóh, L. (1999): Isotopentransmutation – Aus- oder Irrweg der Atomtechnik?; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 49. Jg., Heft 3, 1999, 170-176

Kromp, W. und R. Lahodynsky (2006): Die Suche nach dem Endlager – „Make things small!“, in: „Wohin mit dem radioaktiven Abfall – Perspektiven für eine sozialwissenschaftliche Endlagerforschung“, Hrsg. v. Peter Hocke u. Armin Grunwald, Berlin, Edition Sigma, 2006

Lowson, R.T. and Brown (1995): Geochemistry Contributing to the Rehabilitation of the Wismut Uranium Mines, Germany; ICEM '95, Fifth International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Berlin, September 3-7, 1995, 1397-1403

Macy J. (2005): Nuclear Guardianship - responsible care for radioactive materials, <http://www.joannamacy.net/html/nuclear2.html> and An Ethic of Nuclear Guardianship - Values to Guide Decision-Making on the Management of Radioactive Materials, <http://www.nonukes.org/r02ethic.htm>

Metcalf, P.E. (2004): The Joint Convention – Main Results from the first Review Meeting; Vortrag mit Diskussion auf der Tagung DisTec 2004 International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26-28, 2004

NAS (1996): National Academy of Sciences, 1996: www.nap.edu/books/0309052262/html/

Nies, A. (2004): The Plan for the Implementation of the AkEnd Recommendations; Vortrag mit Diskussion auf der Tagung DisTec 2004 International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26-28, 2004

Nuclear Fuel (2003): Nuclear Fuel Vol. 28, No. 12, July 7, 2003

Nuclear Fuel (2006a): Nuclear Fuel, Vol. 31, No. 12, June 5, 2006

Nuclear Fuel (2006b): Nuclear Fuel Vol. 31, No. 13, June 19, 2006

NWTRB (2006): Report to The U.S. Congress and The Secretary of Energy – January 1, 2005, to February 28, 2006; U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, Arlington, VA, June 2006

OECD (2004): OECD Nuclear Energy Agency: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz – Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands; OECD/NEA, Paris 2004

OSPAR (2000): OSPAR Decision 2000/1 on Substantial Reductions and Elimination of Discharges, Emissions and Losses of Radioactive Substances, with Special Emphasis on Nuclear Re-processing; Meeting of the OSPAR Commission, Copenhagen, 26-30 June 2000

Pather, T. (2005): Session summary “The Safety Case and Confidence Building”; International Conference on the Safety of Radioactive Waste Disposal, Tokyo, 3-7 October 2005 (<http://www-ns.iaea.org/meetings/rw-summaries/tokyo-2005-rad-waste-safety-disposal.htm>)

Platts (2004): Nuclear News Flashes, Friday, July 7, 2004; sowie: Nucleonics Week, Vol. 45, No. 33, August 12, 2004

Ryhänen, V. (2004): Progress of the Finnish Deep Repository Program towards Implementation; Vortrag mit Diskussion auf der Tagung DisTec 2004 International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26-28, 2004

Shimomura (2004): Einleitende Worte, DisTec 2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26-28, 2004

van den Berg, R.J. and H. Damveld (2000): Discussions on Nuclear Waste; Studie im Auftrag der Niederländischen Kommission für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (CORA), Wageningen/Groningen, Januar 2000

Vrijen, J. (1999): Reversibility/Retrievability – Issues and Implications; Euradwaste 1999, Fifth European Conference on Radioactive Waste Management and Disposal and Decommissioning, Luxembourg, 15 – 18 November 1999

Warwick, P. et al. (1999): Partitioning and Transmutation – Summary of the Discussions; Euradwaste 1999, Fifth European Conference on Radioactive Waste Management and Disposal and Decommissioning, Luxembourg, 15 – 18 November 1999

Warwick, P. et al. (1999): Role of Colloids and Organic Substances in Radionuclide Transport: State of the Art; Euradwaste 1999, Fifth European Conference on Radioactive Waste Management and Disposal and Decommissioning, Luxembourg, 15 – 18 November 1999

5 Terror und Kriegsgefahr*

Helmut Hirsch

Unter Mitarbeit von Oda Becker

August 2006

Anmerkung des Herausgebers:

Eine Bewertung der nuklearen Option wäre unvollständig ohne Betrachtung möglicher Auswirkungen von Terrorismus und Krieg: ein umfassenderes Papier zu diesem Thema wurde vorbereitet und der Österreichischen Bundesregierung zur Verfügung gestellt. Es sind jedoch Informationen und Fragen in diesem Zusammenhang zu diskutieren, die aus Gründen der Vorsicht nicht zur Publikation geeignet sind. Daher wurde für die vorliegende Druckausgabe eine gekürzte Fassung durch Streichung derartiger Textteile erzeugt. Trotzdem bleibt die Relevanz von Terror und Krieg für die Bewertung der nuklearen Option offenkundig.

Inhaltsverzeichnis

5	Terror und Kriegsgefahr*	120
5.1	Einführung	120
5.2	Angriffsziele und deren Verwundbarkeit	123
5.3	Mögliche Angriffsszenarien	125
5.4	Folgen von Terror- oder kriegerischen Angriffen auf Atomanlagen oder Transporte	125
5.4.1	Beschuss eines Kernkraftwerkes	126
5.4.2	Bombenangriff auf ein Zwischenlager	126
5.4.3	Angriff auf einen Transport von Uranhexafluorid	127
5.5	Gegen- und Schutzmaßnahmen und ihre Probleme und Grenzen	128
5.5.1	Vorbeugendes Abschalten	129
5.5.2	Strukturelle Nachrüstung gegen Flugzeugangriff und andere Gefahren	129
5.5.3	Vernebelung als Schutz gegen gezielte Flugzeugabstürze und andere Gefahren	130
5.5.4	Aufstockung von Personal (und Einrichtungen) zur Bekämpfung der Folgen eines Angriffes	131
5.5.5	Verstärkung der Wachmannschaft	131
5.5.6	Zusätzliche Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes	132
5.5.7	Bemerkungen zu militärischen, polizeilichen und administrativen Schutzmaßnahmen gegen Terror-Angriffe	133
5.6	Fazit	134
5.7	Literaturhinweise und Anmerkungen	136

* Gekürzte Fassung eines Berichtes an die Österreichische Bundesregierung

5 Terror und Kriegsgefahr*

5.1 Einführung

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts gab es zahlreiche Beispiele für vorsätzliche Akte des Terrorismus, auch schon lange vor dem 11. September 2001. Vielfach haben Terrorgruppen ihre Entschlossenheit und Fähigkeit demonstriert, Anschläge auf exponierte Ziele auszuführen. Ein Beispiel dafür ist der Anschlag der Hisbollah auf eine US-Kaserne in Beirut am 23. Oktober 1983 durch ein Selbstmordkommando. Eine technisch hoch entwickelte Autobombe explodierte, die das Gebäude zerstörte und 241 Soldaten tötete. Ein von den Liberation Tigers of Tamil Eelam am 21. Juni 1991 in Colombo, Sri Lanka, mit einer Autobombe verübter Anschlag verursachte eine große Zahl von Verletzten und 51 Tote. Die Liste lässt sich fortsetzen.

Aufgrund der gegebenen globalen Situation erscheint die Terror-Gefährdung zu Beginn des 21. Jahrhunderts als besonders groß. Diese, durch wirtschaftliche, militärische, ideologische und politische Gegebenheiten bestimmte Gesamtsituation soll hier nicht diskutiert und bewertet werden. Ein Hinweis erscheint allerdings wichtig: Obgleich zurzeit vor allem die Bedrohung aus einer bestimmten Richtung (islamistischer Fundamentalismus) im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses steht, gibt es weltweit gesehen eine Vielzahl von unterschiedlichen weltanschaulichen Richtungen und Organisationen, aus denen sich potenzielle Tätergruppen rekrutieren können. Beispielsweise wurde das Bombenattentat auf ein Gebäude der US-Bundesregierung in Oklahoma, bei dem am 19. April 1995 169 Menschen getötet und über 500 verletzt wurden, von Rechtsextremisten aus den USA verübt [Thompson 1995]. Die Bombenanschläge der ETA in Spanien in den letzten Jahren sind ein weiteres Beispiel für die Vielfältigkeit der terroristischen Bedrohung.

Es gibt zahlreiche potenzielle Ziele für terroristische Angriffe. Industrieanlagen, Bürohochhäuser in Stadtkernen oder auch gefüllte Sportstadien könnten „attraktiv“ erscheinen, wenn eine Terrorgruppe die Tötung möglichst vieler Menschen auf einen Schlag beabsichtigt. Die Wahl eines Kernkraftwerkes als Angriffsziel könnte jedoch aus folgenden Gründen bzw. aus einer Kombination dieser Gründe erfolgen:

- Wegen des Symbolcharakters – Kernenergie kann als Inbegriff technologischer Entwicklung, als typische „Hightech“ gesehen werden. Dabei handelt es sich darüber hinaus um eine Technik mit zivil/militärischem Doppelcharakter. Diese wird von vielen Menschen (zu Recht) als potenziell besonders gefährlich angesehen. Daher können Angriffe eine besonders hohe psychologische Wirkung haben.
- Wegen der langfristigen Wirkung – ein Angriff kann zu weiträumigen radioaktiven Kontaminationen mit langlebigen Radionukliden führen. Der angegriffenen Region wird damit sozusagen langfristig ein Stempel der Vernichtung aufgedrückt und darüber hinaus über Jahrzehnte ein wirtschaftlicher Schaden zugefügt.
- Wegen der unmittelbaren Wirkung auf die Elektrizitätserzeugung in der betroffenen Region – Kernkraftwerke sind, wo immer sie betrieben werden, wichtige Bestandteile der Stromversorgungssysteme und speisen mit hoher Leistung ins Netz ein. Der schlagartige Ausfall einer solchen Großanlage kann unter Umständen zu Netzzusammenbrüchen führen.

* Gekürzte Fassung eines Berichtes an die Österreichische Bundesregierung

- Wegen der möglichen länger andauernden Wirkung auf die Elektrizitätserzeugung nicht nur in der betroffenen Region, sondern auch in anderen Regionen (möglicherweise sogar allen Staaten, in denen Kernkraftwerke betrieben werden) – ein erfolgreicher Angriff gegen ein Kernkraftwerk in einem Land ist gleichzeitig ein Angriff gegen alle Kernkraftwerke in der Welt [Braun et al. 2002]. Nachdem ein solcher Angriff die Verwundbarkeit eines KKW demonstriert hat, werden u. U. vorsorgliche Abschaltungen von KKW im betroffenen Land, aber auch anderswo erfolgen. Damit wird eine große weltweite Aufmerksamkeit erreicht.

Bei Angriffen auf andere Atomanlagen oder auf Atomtransporte wird eine Wirkung auf die Elektrizitätserzeugung, jedenfalls direkt, nicht eintreten. Der Symbolcharakter sowie auch die Möglichkeit langfristiger Kontamination von Land sind jedoch ebenfalls gegeben.

Terror-Angriffe auf kerntechnische Anlagen sind mit den verschiedensten Mitteln möglich. Eine Vollständigkeit bei der Aufzählung der denkbaren Szenarien kann prinzipiell nicht erzielt werden, weil es schlechthin nicht möglich ist, alle Produkte menschlicher Fantasie vorherzusehen.

Grundsätzlich können Angriffe variieren im Hinblick auf die Mittel der Einwirkung, das konkrete Angriffsziel, Organisation, Anzahl und Aufwand der Angreifer und andere Faktoren. Für jede dieser Variablen gibt es viele Möglichkeiten der Realisierung. Der Versuch, auch nur das Vorhersehbare vollständig zu erfassen, würde also schon zu einer Matrix mit unzähligen unterschiedlichen Szenarien führen.

Terroristische Angriffe auf Nuklearanlagen stellen kein hypothetisches Risiko dar. In der Vergangenheit wurden bereits mehrmals Anschläge durchgeführt. Dabei kam es glücklicherweise bisher noch nicht zu einer Katastrophe mit schweren radioaktiven Freisetzungen.

Zum Beispiel bahnte sich ein Mann im Februar 1993 mit seinem Wagen einen Weg durch die Haupteinfahrt bis zur Turbinenhalle des Atomkraftwerkes Three Mile Island 1 in den Vereinigten Staaten [Thompson 1995, USNRC 1993]. Im November 1994 gab es eine Bombendrohung gegen das Atomkraftwerk Ignalina in Litauen. Glücklicherweise lief das Ultimatum ab, ohne dass es zur Explosion kam; es wurde auch keine Bombe im Kraftwerk gefunden [Nucleonics Week 1994]. Im Dezember 1995 warnte die US Regierung die Russische Föderation und die anderen Mitglieder der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten vor der Möglichkeit von tschetschenischen Terrorangriffen auf Atomkraftwerke auf ihrem Territorium. Die Warnung beruhte auf einem Psychogramm des Tschetschenischen Führers Dzhokar Dudayev [Nucleonics Week 1995].

Eine weitere Bedrohung, die in der derzeitigen Weltlage besondere Beachtung verdient, stellen Kriegseinwirkungen auf Atomanlagen dar, obwohl das 1. Protokoll zur Genfer Konvention Angriffe auf Kernanlagen verbietet. Seit dem Fall des Eisernen Vorhanges kommt es häufiger zu „kleinen“, lang andauernden und regional begrenzten Kriegen. Diese können mit dem Zerfall einer größeren staatlichen Einheit verbunden sein, oder auch mit Bestrebungen von Bevölkerungsgruppen, die Unabhängigkeit von einer solchen Einheit zu erreichen [Münkler 2003]. Die oben für Terrorangriffe genannten Gründe könnten bei einem solchen Krieg eine der Parteien dazu motivieren, eine Atomanlage anzugreifen.

Eine andere Form kriegerischer Auseinandersetzung, zu der es u. a. auch als Folge eines solchen langwierigen, regionalen Krieges kommen kann, stellen Interventionskriege dar. Solche Kriege sind dadurch charakterisiert, dass westliche Industriestaaten ein Land angreifen, von dem eine

tatsächliche oder behauptete Bedrohung ausgeht. Eigeninteressen der angreifenden Staaten spielen dabei oft eine wichtige Rolle. Wenn das angegriffene Land über Atomanlagen verfügt, besteht die Gefahr, dass diese bei Kriegshandlungen unbeabsichtigt beschädigt werden. Weiterhin könnte eine intervenierende Macht Kraftwerke angreifen, um die Stromversorgung des feindlichen Landes lahm zu legen. Dabei würde wahrscheinlich angestrebt werden, radioaktive Freisetzungen zu vermeiden; solche Angriffe würden sich auf konventionelle Teile eines Kernkraftwerkes (Turbinenhalle, Umspannwerk) konzentrieren. Wegen der kompakten Anordnung der einzelnen Gebäude auf dem Gelände besteht dennoch die Gefahr, dass sicherheitsrelevante Anlagen in Mitleidenschaft gezogen werden. Es ist auch in Betracht zu ziehen, dass Zerstörungen am konventionellen Teil der Anlage, etwa durch Ausfall der Wärmeabfuhr oder der Netz-anbindung, zu radioaktiven Freisetzungen führen. Überdies kann in Zeiten kriegerischer Auseinandersetzungen die Elektrizitätsversorgung zusammenbrechen. In Kombination mit weiteren Zerstörungen an der Infrastruktur kann auch dies in letzter Konsequenz bei Kernkraftwerken zu Störfällen und Unfällen mit Auswirkungen auf die Umgebung führen.

Ebenso ist denkbar, dass Atomanlagen, die militärischen Zwecken dienen oder bei denen dies befürchtet wird, gezielt zerstört werden. In solchen Fällen mag die Freisetzung von radioaktivem Material vom Angreifer nicht beabsichtigt sein, aber das Risiko wird in Kauf genommen. Der israelische Luftangriff am 7. Juni 1981, bei dem der Forschungsreaktor in Tuwaitha im Irak zerstört wurde, kann als Beispiel für derartige Angriffe gelten. Der Reaktor war noch nicht in Betrieb und es wurde keine Radioaktivität freigesetzt. Dennoch zeigt dieses Beispiel, dass derartige Überlegungen keineswegs nur theoretischer Natur sind [Thompson 1995].

Bedrohungen durch Kriegshandlungen können auch in Europa nicht ausgeschlossen werden. Während der kriegerischen Auseinandersetzungen auf dem Balkan in den frühen 90er Jahren war das Kernkraftwerk Krško in Slowenien mehrmals gefährdet. Im Juni 1991 wurde es von drei Jagdbombern der Jugoslawischen Luftwaffe überflogen. Es erfolgte kein Angriff, der Überflug hatte jedoch eindeutig den Charakter einer Warnung. Im September 1991 näherte sich der Krieg erneut der slowenischen Grenze. In der Umgebung von Zagreb fanden Kampfhandlungen statt, die sich leicht auf slowenisches Gebiet hätten ausweiten können [Hirsch et al. 1997].

Terror-Angriffe sind, wenn es zu einer kriegerischen Auseinandersetzung kommt, auch in Kombination mit Kriegshandlungen denkbar.

Insbesondere ist dies im Falle eines asymmetrischen Krieges zu befürchten – das heißt, beim Angriff eines Gegners auf ein militärisch sehr viel schwächeres Land, zum Beispiel im Rahmen eines Interventionskrieges. Bei dem Angegriffenen könnten die Hemmungen gegenüber Aktionen, die in erster Linie die Zivilbevölkerung des Gegners treffen, drastisch herabgesetzt werden, wenn er keine anderen Möglichkeiten des Zurückschlagens gegen den übermächtigen Gegner sieht, und/oder selbst bereits große Verluste bei der Zivilbevölkerung zu beklagen hatte.

Nicht behandelt wird in diesem Bericht der Einsatz von Massenvernichtungswaffen, insbesondere Kernwaffen, gegen Kernkraftwerke – sei es durch Terroristen oder bei Kriegshandlungen.

5.2 *Angriffsziele und deren Verwundbarkeit*

Von allen kommerziellen Atomanlagen stellen wohl in erster Linie Kernkraftwerke „attraktive“ Ziele für terroristische oder kriegerische Angriffe dar. Sie sind am weitesten verbreitet, enthalten ein erhebliches radioaktives Inventar und sind, wie schon erwähnt, wichtige Komponenten der Stromversorgung. Darüber hinaus handelt es sich um große Bauwerke mit einer markanten, auch über größere Entfernungen deutlich wahrnehmbaren Struktur. Deshalb liegt der Schwerpunkt dieser Studie auf Atomkraftwerken als mögliche Angriffsziele.

Das Gelände eines Kernkraftwerkes umfasst mehrere Zehntausend Quadratmeter. Das Herzstück der Bauwerke auf dieser Fläche ist das Reaktorgebäude, das, wie der Name sagt, den Reaktor mit dem hochradioaktiven Kernbrennstoff (Größenordnung: 100 Tonnen) sowie wichtige Kühl- und Sicherheitseinrichtungen enthält.

Es ist anzunehmen, dass dieses Gebäude bei einem Angriff das primäre Ziel darstellen würde. Ist der Reaktor in Betrieb, wenn der Angriff erfolgt, und kommt es zu einer Unterbrechung der Kühlung, kann eine Kernschmelze in sehr kurzer Zeit (Größenordnung eine Stunde) eintreten. Auch bei abgeschaltetem Reaktor ist die Nachzerfallswärme erheblich, so dass der Brennstoff, wenn auch langsamer, zum Schmelzen kommen kann.

Zerstörung des Reaktorgebäudes mit Ausfall der Kühlsysteme würde den denkbar gefährlichsten Reaktorunfall nach sich ziehen: Rasche Kernschmelze bei offenem Containment. Die Folge sind radioaktive Freisetzungen, die besonders frühzeitig und in besonders hohem Ausmaße erfolgen.

Eine weitere verwundbare Stelle mit erheblichem radioaktivem Inventar stellt das Brennelement-Lagerbecken dar. Es kann bei manchen Anlagen mehr Brennstoff, und damit mehr langlebige radioaktive Stoffe, enthalten als der Reaktor selbst. In manchen Kernkraftwerken befindet sich dieses Lager innerhalb des Containments und ist mit einer Betonhülle gegen Einwirkungen von außen geschützt (z. B. deutsche Druckwasserreaktoren). Bei vielen Kraftwerken ist es in einem eigenen Gebäude mit geringerem Schutz angeordnet.

Neben dem Reaktorgebäude und ggf. dem Gebäude mit dem Brennelement-Lagerbecken gibt es weitere Bauwerke und Einrichtungen von unterschiedlicher sicherheitstechnischer Bedeutung.

Soweit bisher bei Kernkraftwerken eine Auslegung gegen zivilisationsbedingte Einwirkungen von außen (z. B. Flugzeugabsturz) realisiert wurde, was keineswegs bei allen Anlagen der Fall ist, wurde von einer punktuellen Einwirkung ausgegangen (etwa durch Absturz einer relativ kleinen Militärmaschine und nicht eines großen Verkehrsflugzeuges). Als wichtigste Gegenmaßnahme wurden die für die Sicherheit wichtigen Einrichtungen räumlich getrennt. Damit sollte erreicht werden, dass jeweils nur eine einzige für die Sicherheit wichtige Einrichtung zerstört werden kann – und damit andere Systeme verfügbar bleiben.

So kann beispielsweise bei Ausfall der Elektrizitäts-Eigenbedarfsversorgung über den entsprechenden Transformator die Notstromversorgung mit Dieselgeneratoren einspringen. Bei Zerstörung der Warte mit den wichtigen Leit- und Kontrolleinrichtungen sollten die Einrichtungen des Notspeisegebäudes bzw. des Notstandsgebäudes in der Lage sein, die minimal erforderlichen Sicherheitsfunktionen (Wärmeabfuhr aus dem Reaktor) zu gewährleisten.

Bleibt bei einem Angriff das Reaktorgebäude intakt, so ist in der Folge eine nicht beherrschbare Situation dennoch wahrscheinlich, wenn mehr als eine andere sicherheitsrelevante Einrichtung auf dem Gelände zerstört wird. Dies kann auch bei räumlicher Trennung wichtiger Anlagenteile geschehen.

Neben Kernkraftwerken könnten andere „interessante“ Ziele für Angriffe, die weiträumige radioaktive Kontaminationen bewirken sollen, vor allem jene Atomanlagen sein, in denen große radioaktive Inventare gelagert werden. Dabei ist vor allem an Zwischenlager jeder Art zu denken, die sich auch am gleichen Standort mit anderen Anlagen (insb. Kraftwerken oder Wiederaufarbeitungsanlagen) befinden können.

Eine Analyse der relativen Wahrscheinlichkeit von Angriffen auf Atomkraftwerke einerseits und andere Atomanlagen andererseits kann hier nicht durchgeführt werden. Es wird nur das technische Potenzial diskutiert.

Am Standort von Wiederaufarbeitungsanlagen werden hochaktive, flüssige und andere radiologisch relevante und langlebige Abfälle gelagert: radioaktives Material, das jenes im Reaktorkern eines Druckwasserreaktors bei weitem übersteigt [z.B. Thompson 2003].

Auch Standort-Zwischenlager für abgebrannten Brennstoff in kombinierten Transport- und Lagerbehältern können Kapazitäten von über 1.500 t aufweisen. Das Potenzial für große Freisetzungen ist bei derartigen Lagern geringer als bei Nasslagern, aber immer noch erheblich [Meister et al. 2002].

Im Bereich der Brennstoffversorgung sind vor allem Lager von Uranhexafluorid potenziell gefährdet. Uran muss zur Anreicherung in diese chemische Form gebracht werden. Das anfallende abgereicherte Uran, das nicht zur Fertigung von Brennelementen verwendet wird, aber für etwaigen späteren Gebrauch aufbewahrt wird, wird in der Regel als Hexafluorid gelagert.

Uranhexafluorid ist ein flüchtiger Stoff, der bei Freisetzung mit der Luftfeuchtigkeit reagiert und u. a. hochtoxische Fluorwasserstoffsäure (HF) bildet.

In den USA werden zurzeit beispielsweise an drei verschiedenen Standorten insgesamt rd. 57.000 Stahlbehälter mit insgesamt knapp 700.000 t abgereichertem Uranhexafluorid gelagert¹.

Ein weiteres potenzielles Angriffsziel für Terroristen sind radioaktive Stoffe während eines Transports. In erster Linie ist dabei zu denken an:

1. Abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (hohes spezifisches Inventar an radioaktiven Stoffen)
2. Plutonium (hohe Toxizität, insbesondere bei Freisetzung als Aerosol)
3. Uranhexafluorid (hohe chemische Toxizität der freigesetzten Stoffe, dadurch sofortige schädigende Wirkungen (Lungenschädigung))

Da die transportierten Mengen im Bereich von maximal einigen Tonnen liegen, sind die zu erwartenden Freisetzungen selbst bei weitgehender Zerstörung der Behälter um Größenordnungen

¹ <http://web.ead.anl.gov/uranium/faq/storage/faq16.cfm>, eingesehen am 15.06.2004

geringer als jene, die bei Angriffen auf Lager erzielt werden können. Andererseits ist der Ort der Freisetzung nicht vorhersehbar, da Angriffe im Prinzip überall längs der Transportrouten erfolgen können (z.B. während der Ladung/Entladung in Häfen oder während des Transportes durch große Städte). Freisetzungen können also auch in städtischen Bereichen erfolgen und so bei relativ geringer betroffener Fläche viele Menschen schwer schädigen.

5.3 Mögliche Angriffsszenarien

Seit dem 11. September 2001 konzentriert sich die öffentliche Diskussion weitgehend auf Selbstmordangriffe mit einem Verkehrsflugzeug. In Wahrheit ist die Bedrohung jedoch erheblich vielfältiger.

In der Folge werden verschiedene Möglichkeiten für Terror-Angriffsszenarien beispielhaft aufgelistet. Fast alle davon könnten auch zu Kriegszeiten von eingesickerten Kommandotruppen oder einer fünften Kolonne durchgeführt werden. Einige der Szenarien können praktisch in unveränderter Form auch im Rahmen von Kriegseinwirkungen realisiert werden.

Angriffsszenarien für ortsfeste Atomanlagen (Kernkraftwerke und andere Anlagen) können umfassen [Hirsch et al. 2005]:

- Angriff aus der Luft
- Beschuss von außerhalb des Anlagengeländes
- Eindringen auf das Gelände
- Angriffe von bzw. unter Mitwirkung von Innentätern
- Angriffe auf außen gelegene Anlagenteile

Auch Transporte radioaktiver Stoffe, insbesondere solche mit hohem radioaktivem Inventar, hoher Radiotoxizität und/oder hoher chemischer Toxizität könnten Ziel eines Angriffes werden.

Atomanlagen bzw. Atomtransporte sind nicht in gleichem Maße gegenüber allen diesen Szenarien verwundbar. Die meisten angeführten Angriffsmöglichkeiten können im schlimmsten Falle zu sehr schweren Freisetzungen führen, manche werden eher beschränkte Wirkungen haben. Unterschiedliche Anlagenteile können gegenüber verschiedenen Angriffsarten in unterschiedlichem Maße verwundbar sein.

5.4 Folgen von Terror- oder kriegerischen Angriffen auf Atomanlagen oder Transporte

Als Beispiele werden hier aus der langen Liste der denkbaren Szenarien drei betrachtet – Beschuss eines Kernkraftwerkes, Bombenabwurf auf ein Zwischenlager mit abgebranntem Brennstoff und Angriff auf einen Transport von Uranhexafluorid. Diese Beispiele sollen die große Bandbreite möglicher Angriffsziele und Szenarien veranschaulichen.

5.4.1 Beschuss eines Kernkraftwerkes

Angriffe auf ein Kernkraftwerk können einen Reaktorunfall der schwersten Kategorie auslösen: Eine Kernschmelze bei frühzeitigem Versagen des Containments.

Ein mögliches Szenario wäre der Beschuss mit einer gezogenen 15,5 cm-Haubitze, wie sie heute zur Standard-Bewaffnung fast aller Armeen gehört, im Rahmen von Kriegshandlungen oder auch als terroristischer Angriff. Waffen dieser Art sind bei den Armeen der Welt sehr verbreitet und könnten auch von Terroristen beschafft werden.

Bei Einsatz von Hochexplosiv-Geschossen, die Standardmunition der Haubitzen sind, ist mit Zerstörung des Gebäudes und großen Schäden in seinem Inneren zu rechnen. Ein großer Teil des Anlagenpersonals wird getötet oder verletzt werden. Auf dem Anlagengelände kann es durch nicht genau im Ziel liegende Schüsse zu weiteren Schäden kommen. All dies macht es außerordentlich schwer, rasch und effektiv Gegenmaßnahmen durchzuführen.

Innerhalb weniger Stunden kommt es zur Kernschmelze und zu massiven Freisetzungen von Radioaktivität. Die freigesetzte Menge kann im Bereich von 50 – 90 % des radioaktiven Inventars des Reaktors an flüchtigeren Stoffen wie Jod oder Cäsium liegen, dazu kommen weitere Nuklide wie Strontium-90, von denen ein Anteil von einigen Prozent des Inventars in die Atmosphäre gelangt. Dies entspricht bei einem Kernkraftwerk der 1000 MW-Klasse beispielsweise einigen 100.000 Tera-Becquerel (TBq) an Cäsium-137. Zum Vergleich: Bei dem Unfall in Tschernobyl wurden etwa 85.000 TBq Cs-137 frei [OECD Nuclear Energy Agency 1996]. Nach einer Analyse von L. Hahn, zu diesem Zeitpunkt Vorsitzender der Deutschen Reaktor Sicherheitskommission (RSK), würden die Folgen einer nationalen Katastrophe entsprechen [Hahn 1999]. Bis zu 10.000 km² müssten kurzfristig evakuiert werden, es wäre mit bis zu 15.000 akuten Strahlentoten und bis zu 1 Million Krebstoten zu rechnen; dazu kämen unzählige Erbschäden. Die Flächen, die langfristig so verseucht wären, dass die Bevölkerung umgesiedelt werden muss, könnten sich auf bis zu 100.000 km² belaufen. Dies ist mehr als die Fläche von Portugal. Die wirtschaftlichen Folgen sind mit rd. 6 Billionen Euro abgeschätzt worden.

Bei vielen Reaktoren ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass auch das Brennelement-Lagerbecken bei dem Angriff zerstört oder schwer beschädigt wird. Die Freisetzungen können ein Mehrfaches der oben angegebenen erreichen, mit entsprechend schlimmeren Folgen.

5.4.2 Bombenangriff auf ein Zwischenlager

Ein derartiger Angriff wäre primär als Kriegshandlung denkbar. Es ist jedoch auch nicht auszuschließen, dass eine terroristische Organisation sich eines bewaffneten Kampfflugzeuges bemächtigt oder einen Piloten einer Luftwaffe durch Bestechung, Erpressung oder ideologische Überzeugung dazu bringt, einen solchen Angriff durchzuführen.

In dem hier betrachteten Beispiel wird davon ausgegangen, dass es sich um ein Behälter-Trockenlager handelt. Diese Form der Lagerung ist insbesondere in Deutschland sowie einigen neuen EU-Mitgliedsstaaten zunehmend gebräuchlich und ist weniger verwundbar gegenüber Angriffen als die Lagerung in Becken, die weltweit zurzeit erheblich weiter verbreitet ist (z. B. gibt es Lagerbecken mit sehr großem Inventar in La Hague, Frankreich).

Eingesetzt werden könnte z. B. eine Bombe vom Typ BLU-109 (908 kg), die bei den Luftwaffen weit verbreitet ist. Es ist davon auszugehen, dass bei einem gezielten Abwurf das Dach der Lagerhalle durchschlagen wird; ein getroffener Behälter wird schwer beschädigt. Luft kann ins Innere des Behälters eindringen. Das Hüllrohr-Material der abgebrannten Brennelemente (eine Legierung auf Zirkonbasis) wird teilweise fragmentiert und fängt Feuer. Aus einem Behälter können, wenn es sich z. B. um einen modernen deutschen CASTOR V/19 handelt, etwa 10.000 TBq Cäsium-137 freigesetzt werden, bei Zerstörung bzw. schwerer Beschädigung von mehreren Behältern entsprechend mehr.

Eine derartige Freisetzung kann noch in Entfernungen bis zu 10 km langfristige Umsiedlungen erforderlich machen. Bis zu noch größeren Entfernungen hin resultieren erhebliche radioaktive Bodenkontaminationen, die drastische Einschränkungen bei der landwirtschaftlichen Nutzung bedeuten. Mit akuten Strahlentoten ist nicht zu rechnen; die Zahl der strahleninduzierten Krebsfälle hängt von der Bevölkerungsdichte sowie der Schnelligkeit und Effizienz der Maßnahmen des Katastrophenschutzes ab.

5.4.3 Angriff auf einen Transport von Uranhexafluorid

Uranhexafluorid wird, wenn es sich um noch anzureicherndes Material oder abgereichertes Uran („tails“) handelt, in Behältern vom Typ 48“Y transportiert, die maximal 12,5 t UF_6 aufnehmen können. Die Behälter sind aus Stahl, ihre Wandstärke beträgt lediglich 16 mm. Es wird jeweils ein Behälter auf einem LKW transportiert, bei Bahntransport bis zu drei mit einem Waggon [URENCO 2001].

Bei einem Terror-Angriff auf einen derartigen Transport auf der Straße könnte ein Tankwagen, z. B. mit Benzin oder Flüssiggas, als „Waffe“ eingesetzt werden. Nach einem heftigen Zusammenprall mit dem Uranhexafluorid-Transport ist von schwerer Beschädigung des Tankwagens auszugehen. Ein mehrstündiges, heißes Feuer am Unfallort resultiert.

Bei einem Behälter vom Typ 48“Y kommt es bereits nach ca. 50 Minuten in einem Feuer mit Flammentemperatur 800 °C zum Versagen. Bei höheren Flammentemperaturen (1000 °C und mehr können durchaus erreicht werden) tritt das Versagen früher ein. Der Stahlzylinder birst, ein Teil des UF_6 wird hoch in die Luft geschleudert, der Rest brockenweise in die nähere Umgebung geworfen. Durch Reaktion mit dem Wassergehalt der Luft entsteht u. a. HF (Flusssäure). Flusssäure ist sowohl ein schweres Atem-, als auch Kontaktgift.

In unmittelbarer Umgebung des Unfallortes (bis zu ca. 100 m Entfernung) besteht akute Lebensgefahr. In bis zu 500 m Entfernung werden Menschen schweren Vergiftungen und Verätzungen durch HF ausgesetzt sein. Bei längerem Aufenthalt besteht auch in diesem Bereich noch Lebensgefahr. Noch in Entfernungen von über 1 km besteht für empfindliche Menschen das Risiko gesundheitlicher Schädigung [Albrecht et al. 1988].

Die kurzfristigen gesundheitlichen und teilweise tödlichen Folgen eines Anschlages auf einen derartigen Transport, besonders während dieser durch einen Ballungsraum fährt, können also allein durch die Freisetzung von Flusssäure drastisch sein. Tausende Tote und Verletzte sind möglich. Dazu kommt die Kontamination der Unfallumgebung durch Uran, einem relativ schwach radioaktiven, aber chemisch toxischem Schwermetall. Handelt es sich um Uran, das bei der Wiederaufarbeitung gewonnen wurde, kann es weiterhin durch andere Radionuklide verunreinigt sein.

Bei einem Anschlag in einer ländlichen Gegend ist im Übrigen mit schweren Schäden bei der betroffenen Tier- und Pflanzenwelt zu rechnen.

5.5 Gegen- und Schutzmaßnahmen und ihre Probleme und Grenzen

Verschiedene Maßnahmen sind denkbar, die möglicherweise bei Atomanlagen einen gewissen Schutz gegen Kriegseinwirkungen und Terrorangriffe bewirken können. Diese Maßnahmen werden (im Hinblick auf Terrorangriffe) bereits von Betreibern und zuständigen Behörden geprüft; manche wurden bereits umgesetzt bzw. konkret geplant.

Die wichtigsten Punkte, mit denen sich teilweise auch die öffentliche Diskussion im Zusammenhang mit Terrorangriffen beschäftigt, sind:

1. Vorbeugendes Abschalten von Atomkraftwerken
2. Strukturelle Nachrüstung gegen gezielten Flugzeugabsturz und andere Gefahren
3. Vernebelung als Schutz gegen gezielte Flugzeugabstürze
4. Aufstockung von Personal (und Einrichtungen) zur Bekämpfung der Folgen eines Angriffes
5. Verstärkung der Wachmannschaft
6. Realisierung zusätzlicher Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes

Die Punkte 2 bis 5 beziehen sich auf alle Arten von Atomanlagen.

Die erwähnten Schutzmaßnahmen gelten in der Regel nicht einem bestimmten Angriffsszenarium; sie könnten potentiell in unterschiedlichen Fällen Wirkung entfalten.

Alle diese Maßnahmen kommen potenziell auch in Frage, um den Schutz gegen Kriegseinwirkungen zu erhöhen. Vernebelung könnte auch gegen „klassische“ militärische Luftangriffe erwogen werden, nicht nur gegen Selbstmord-Attacken mit Zivilflugzeugen. Eine Verstärkung der Wachmannschaft wird allerdings gegen einen mit militärischen Mitteln einschl. schwerer Waffen vorgehenden Angriff wenig Nutzen bringen.

Im Zusammenhang mit dem Schutz gegen Terror-Angriffe sind außerdem verschiedene Maßnahmen im Gespräch, die dem militärischen, polizeilichen oder administrativen Bereich zuzuordnen sind.

5.5.1 Vorbeugendes Abschalten

Das vorbeugende Abschalten eines Atomkraftwerks, wenn eine Bedrohung besteht, kann bei Angriffen aller Art Sicherheitsmargen erhöhen und insbesondere die Zeitspanne verlängern, die nach dem Angriff für Gegenmaßnahmen zur Verfügung steht.

Die thermische Leistung der Brennelemente (Zerfallswärme) nimmt jedoch im abgeschalteten Reaktor relativ langsam ab. Um einen nennenswerten Sicherheitsgewinn zu erzielen und im Ernstfall (bei Intaktbleiben des Einschusses des Brennstoffs) Interventionszeiten von ca. einem Tag zur Verfügung zu haben, muss ein Atomkraftwerk (Siede- oder Druckwasserreaktor) spätestens einige Monate bis ein halbes Jahr vor dem Angriff abgeschaltet werden.

Für den Fall, dass Reaktordruckbehälter und/oder Kühlkreislauf beschädigt werden und Kühlmittelverlust eintritt, kann auch vorbeugendes Abschalten keine angemessen langen Interventionszeiten gewährleisten. Allerdings bestehen auch in diesem Falle gewisse Vorteile; die Kernschmelze wird etwas später eintreten.

Sämtliche potenziellen Vorteile des Abschaltens können allerdings stark relativiert werden, wenn sich, wie bei vielen Kraftwerken, das Brennelement-Lagerbecken in exponierter Lage im Reaktorgebäude befindet.

5.5.2 Strukturelle Nachrüstung gegen Flugzeugangriff und andere Gefahren

Gegen Angriffe aus der Luft jeder Art, aber auch gegen Beschuss und Einsatz von Sprengmitteln, wären als Schutzmaßnahmen grundsätzlich strukturelle Nachrüstungen denkbar. Insbesondere käme dabei in Frage:

- Verstärkung der baulichen Strukturen gegen alle Arten von Einwirkungen
- Spezielle Schutzbauten gegen Angriffe aus der Luft (z. B. Türme)
- Spezielle Hindernisse auf dem Gelände gegen Angriffe mit Autobomben

Eine Verstärkung der baulichen Strukturen der Atomanlage selbst stößt allerdings an Grenzen der Machbarkeit und steht bisher nicht ernsthaft zur Diskussion.

Ernsthaft erwogen wurde dagegen die Errichtung von Bauwerken um die Reaktorgebäude, um einen Angriff aus der Luft auf diese zu verhindern. In Deutschland wurde dabei zunächst an Turmbauwerke gedacht [BMU 2002], sowie an die Errichtung von Schutzwällen aus Stahlbeton, um die „Erfolg“ versprechenden Einflugschneisen zu versperren [Financial Times Deutschland 2004]. Diese Konzepte spielen in der öffentlichen Diskussion allerdings keine große Rolle mehr.

Das Prinzip der Schutzbauwerke wäre, egal welches Konzept umgesetzt würde, mit schwerwiegenden Problemen verbunden: Werden die Bauwerke in einem größeren Abstand um die Reaktorgebäude aufgestellt, so wären sehr ausgedehnte und hohe Bauten erforderlich. Bei Abständen von über 200 m können Höhen von 200 m und mehr erforderlich werden. Die Bauten sind damit weithin sichtbar. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie bei Angriffen an-

derer Art (Beschuss) als Orientierungshilfe dienen. Werden die Bauwerke dagegen nahe an den Reaktorgebäuden aufgestellt, ergibt sich das Problem des Platzbedarfes.

Bei der Errichtung massiver Stahlbeton-Strukturen tritt überdies ein neues Sicherheitsproblem auf: Die Zerstörung einer solchen Struktur, ob Wall oder Turm, bei einem Flugzeugangriff wird zur Bildung von schweren Betontrümmern führen, die auf dem Anlagengelände Schaden bewirken können.

Derartige Bauwerke wären als Schutz also allenfalls bei niedrigen Gebäuden, z. B. verbunkerten Atommüll- oder Plutoniumlagern, denkbar. Dabei wären keine so großen Höhen erforderlich.

Etwas anders stellt sich die Problematik im Hinblick auf Hindernisse gegen das Eindringen von Angreifern mit Fahrzeugen dar. Durch die Verhinderung der Benutzung von Fahrzeugen auf dem Anlagengelände werden die Aktionsmöglichkeiten von Terroristen begrenzt. Insbesondere kann bei wirksamen Absperrungen der Einsatz von Autobomben in der Umgebung einer kerntechnischen Anlage verhindert werden. Auch ein militärischer Angreifer kann durch solche Sperren behindert werden. Weiters ist davon auszugehen, dass die Kosten für die Errichtung derartiger Hindernisse gering sind. Jedoch sind durch das relativ hohe Verkehrsaufkommen in der Umgebung solcher Anlagen und teilweise auch auf dem Anlagengelände selbst dieser Schutzmaßnahme Grenzen gesetzt.

Maßnahmen wie die Verstärkung des Zaunes, der das Eindringen von Angreifern verhindern soll, können auch zu einem Sicherheitsgewinn bei geringen Kosten führen.

5.5.3 Vernebelung als Schutz gegen gezielte Flugzeugabstürze und andere Gefahren

Konzepte zur Tarnung von Kernkraftwerken durch Vernebelung, insbesondere zum Schutz gegen gezielten Flugzeugabsturz sind zurzeit in Deutschland besonders intensiv in Diskussion. Die Vernebelung stellt dort das zentrale Element des Schutzkonzeptes dar, entsprechend einer Übereinkunft zwischen den Atomkraftwerksbetreibern und der deutschen Regierung. Diese Maßnahme soll durch die Störung des Navigationssystems GPS (global positioning system) in der Umgebung des betreffenden Atomkraftwerkes ergänzt werden. Es soll zunächst, als Pilotprojekt, beim Atomkraftwerk Grohnde in Niedersachsen umgesetzt werden [BMU 2005]. Allerdings war die Bewertung dieses Konzeptes im April 2006 immer noch nicht abgeschlossen [Deutsche Bundesregierung 2006].

Dabei ist die Adaptation eines militärischen Konzeptes geplant. Dies ist problematisch, da bei der militärischen Vernebelung die Voraussetzungen völlig andere sind als beim Schutz eines Kernkraftwerkes. Eine militärische Nebelhaube soll beispielsweise ein Kriegsschiff kurzfristig vor dem Angriff mit automatisch zielsuchenden Flugkörpern schützen, worauf das Schiff im Schutz des Nebels das Weite sucht. Im Falle des Angriffes auf ein KKW dagegen handelt es sich um ein ortsfestes Ziel; das Flugzeug wird von einem Menschen gesteuert, der länger über dem Ziel kreisen kann, da vom Ziel her kein Gegenangriff zu befürchten ist. Zudem wird ein menschlicher Pilot nicht so leicht zu täuschen sein wie ein automatisches System.

Ein weiteres Problem liegt in der rechtzeitigen Auslösung der Maßnahme. Im dicht besiedelten Europa liegen praktisch alle Kernkraftwerke in der Nähe von Großflughäfen und Luftverkehrsstraßen. Eine Angriffsabsicht wird also u. U. erst sehr spät erkennbar. Weiterhin ist es auch bei erfolgreicher Vernebelung relativ einfach, mit verschiedenen technischen Mitteln dennoch das

bekanntes Ziel zu orten, etwa mit Hilfe von Leuchtsignalen, die durch Komplizen auf dem Boden ausgelöst werden.

Völlig wirkungslos ist das Vernebelungssystem, wenn zu Friedenszeiten Angriffe aus der Luft durch Helikopter oder Militärmaschinen erfolgen, mit Anflug in geringer Höhe. Der Angriff wird in diesem Falle praktisch erst dann erkennbar, wenn er begonnen hat.

Bei ausgedehnter Vernebelung besteht weiterhin die Gefahr, dass durch Sichtbehinderung die Anfahrt von Hilfskräften sowie Gegenmaßnahmen auf dem Gelände (z. B. Löschen von Bränden) gestört werden. Bei einer kleinen Nebelhaube ist dieser Aspekt von untergeordneter Bedeutung. Da dabei teilweise Bauten auf dem Gelände, insbesondere neben dem Reaktorgebäude, noch erkannt werden können, bietet sie andererseits keinen so guten Schutz gegen Angriffe.

Auch das absichtliche Auslösen der Vernebelung durch eine Terrorgruppe (Vortäuschen eines Flugzeugangriffes), die dann im Schutze des Nebels auf dem Boden angreift, ist nicht auszuschließen.

Das begleitende Stören des GPS wurde als problematisch für die Sicherheit des Luftverkehrs kritisiert. Zudem kann ein Flugzeug auch ohne GPS navigieren [Becker 2006].

In Kriegszeiten bietet Vernebelung unter Umständen einen besseren Schutz, da das System ursprünglich auf militärische Bedürfnisse zugeschnitten ist und anfliegende Feinde aufgrund allgemeiner Alarmbereitschaft mit höherer Wahrscheinlichkeit früher erkannt werden. Zum Schutz eines ortsfesten Zieles, dessen Lage genau bekannt ist und das daher mithilfe militärischer Navigationstechniken relativ leicht zu treffen sein dürfte, wird Vernebelung allein dennoch nicht ausreichen.

5.5.4 Aufstockung von Personal (und Einrichtungen) zur Bekämpfung der Folgen eines Angriffes

Zur Bekämpfung der Folgen eines Angriffes werden verschiedene Fachkräfte benötigt. Die Möglichkeiten und Chancen, diese Folgen abzumildern, werden ohne Zweifel verbessert, wenn das entsprechende Personal aufgestockt wird. Dabei kann es sich sowohl um eine Verstärkung des Personals direkt am Standort handeln, wie auch um eine Aufstockung von entsprechenden Einrichtungen in der Nähe der Anlage.

Dabei handelt es sich um medizinisches Personal, Feuerwehr- und Räumungskräfte, Spezialisten zu Entschärfung von Sprengmitteln, kerntechnisches Personal und Strahlenschutz-Experten. Auch entsprechende Geräte und Materialien können am Standort vorgehalten werden.

5.5.5 Verstärkung der Wachmannschaft

Eine Verstärkung der Wachmannschaft auf dem Anlagengelände ist grundsätzlich geeignet, den Schutz gegen den Angriff einer Terror-Gruppe auf dem Boden zu erhöhen. Die Aufgabe der Wachmannschaft besteht in der Abwehr von Angriffen kleiner Gruppen, sowie darin, größere Angriffe zumindest so lange zu verzögern, bis Kräfte der Polizei und/oder des Militärs zur Unterstützung eintreffen.

Allerdings können verstärkte Bewachungsmaßnahmen ihrerseits zu Risiken führen:

- Mitarbeiter einer Schutzmannschaft können von Terroristen erpresst oder bestochen werden, und Angriffe unterstützen.
- Dem Schutz dienende Einrichtungen auf dem Gelände, insbesondere Waffen, auf dem Gelände könnten von Terroristen übernommen werden.
- Bei privaten Wachdiensten stellt sich überdies die Frage nach einer ausreichenden Qualitätskontrolle und einer umfassenden Überprüfung der Mitarbeiter bei der Einstellung.

In einem kürzlich erschienenen Bericht über die US-Firma Wackenhut, die u. a. bei nahezu der Hälfte der Reaktoren in den USA für die Sicherung zuständig ist, wird von Missständen wie schlecht geführten Inventarlisten für Waffen, unsachgemäße Lagerung von Sprengstoffen, nicht ausreichende Kontrolle über Zugangsplaketten, unzuverlässige Positionierung von Wachposten u. ä. berichtet [Service Employees International Union 2004]. Eine andere Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, Wachmannschaften seien häufig zahlenmäßig zu schwach, schlecht ausgerüstet, schlecht ausgebildet, schlecht bezahlt und über ihre genauen Befugnisse im Unklaren [Government Oversight 2002]. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Wachmannschaft bei einem stärkeren Angriff eine Verzögerungstaktik anwenden soll, um gleichzeitig Hilfe von außen herbeizurufen. Bei einem Terror-Angriff ist jedoch damit zu rechnen, dass er innerhalb von drei bis zehn Minuten „erfolgreich“ abgeschlossen ist und nicht zwangsläufig sofort entdeckt wird. Dagegen ist anzunehmen, dass Hilfe von außen (z. B. ein SWAT-Team) ein bis zwei Stunden braucht, um zum Kernkraftwerk zu gelangen. Allenfalls lokale Polizeikräfte könnten innerhalb von etwa zwanzig Minuten vor Ort eintreffen [Government Oversight 2002].

Die Eignung von Übungen, mit denen die Sicherung von Atomkraftwerken getestet werden soll, wird in den USA ebenfalls in Frage gestellt. Es wurde von Nichtregierungsorganisationen kritisiert, dass die gleiche Firma, die bei vielen Reaktoren Wachdienste leistet (Wackenhut, s. o.), auch die Teams ausbildete, die bei diesen Übungen als „Angreifer“ fungieren sollten [Nucleonics Week 2004].

Probleme mit ineffektiven Übungen, mangelhafter Ausrüstung für die Sicherung, ungeeigneten Zugangskontrollen und anderen Mängeln scheinen Mitte 2006 immer noch nicht ausgeräumt zu sein [Nucleonics Week 2006].

Bei kriegerischen Angriffen zahlenmäßig größerer Einheiten, insbesondere wenn diese auch über schwere Waffen verfügen, wird die Wachmannschaft aller Voraussicht nach erst Recht nicht zu wirksamer Verteidigung in der Lage sein.

5.5.6 Zusätzliche Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes

Anlageninterne Notfallschutzmaßnahmen („accident management“) sind in den meisten Kernkraftwerken verfügbar, um einen schweren Unfall beherrschen bzw. seine Folgen noch abmildern zu können. Im Zusammenhang mit einer Erhöhung des Schutzes gegen Terrorangriffe gab es seit dem 11. September 2001 auch erneute Überlegungen zur Verbesserung der anlageninternen Notfallschutzmaßnahmen. Dabei sieht beispielsweise die GRS in Deutschland die Möglichkeit, u. a.

durch Maßnahmen, die die Beherrschbarkeit von Ereignisabläufen in der Anlage verbessern sollen, den Schutzzustand insgesamt zu erhöhen [BMU 2002].

Über die entsprechenden Überlegungen liegen bisher noch keine konkreten Veröffentlichungen vor. Es ist jedoch fraglich, inwieweit auf die bereits durchgeführten Maßnahmen noch aufgesattelt werden kann. Es können nicht beliebig zusätzliche diversitäre Einrichtungen nachgerüstet werden; dies stößt an Grenzen hinsichtlich Platzbedarf und zunehmender Komplexität des Gesamtsystems, die sich im Notfall ungünstig auswirken kann (Verringerung der Übersichtlichkeit).

5.5.7 Bemerkungen zu militärischen, polizeilichen und administrativen Schutzmaßnahmen gegen Terror-Angriffe

Im militärischen, polizeilichen, geheimdienstlichen und administrativen Bereich sind u. a. folgende Schutzmaßnahmen denkbar:

1. Schutz der Anlage durch Militär (dies schließt Luftabwehr sowie Kontrolle einer benachbarten Wasserstraße, soweit vorhanden, ein).
2. Maßnahmen zur Verhinderung einer Flugzeugentführung, z. B. durch Ausweitung der Kontrollen von Flugpassagieren, besserer Schutz von Militärflugzeugen.
3. Maßnahmen zur frühzeitigen Erkennung einer Entführung, d. h. verbesserte Überwachung des Luftverkehrs.
4. Maßnahmen gegen ein entführtes Flugzeug.
5. Ausweitung der Maßnahmen zur Überprüfung und Überwachung von Bediensteten in Anlagen (und Fremdfirmen); Überprüfungen des Vorlebens, dauernde Überwachung (d.h. besserer Schutz gegen Innentäter).

Der erste dieser Punkte könnte offensichtlich auch zur Sicherheit bei Kriegseinwirkungen beitragen.

Schritte zur Verbesserung der Kontrolle von Flugpassagieren sowie der mögliche Einsatz der Luftstreitkräfte werden zurzeit beispielsweise in Deutschland bereits umgesetzt [Deutsche Bundesregierung 2004].

Dagegen stoßen Maßnahmen wie die „Militarisierung“ der Energiewirtschaft sowie ausgeweitete Kontrollen von Flugpassagieren und verstärkte Überprüfung und Überwachung von Bediensteten insbesondere in Friedenszeiten an Grenzen, wenn sie mit dem Ideal einer offenen und demokratischen Gesellschaft vereinbar bleiben sollen.

In einer bemerkenswerten Entscheidung hat das deutsche Bundesverfassungsgericht ein von der Bundesregierung eingeführtes Gesetz für nichtig erklärt, das den Abschuss eines entführten Flugzeuges als letztes Mittel gestattet hätte, um zu vermeiden, dass ein sensibles Ziel getroffen wird [FR 2006].

Bei Einsatz des Militärs zur Sicherung von Kernkraftwerken können, wie bei privaten Wachdiensten, die verstärkten Bewachungsmaßnahmen überdies selbst zu Risiken führen. Auch Militär-

personal könnte durch Erpressung, Verführung oder anderes von Terroristen rekrutiert werden. Weiterhin könnten militärische Einrichtungen auf oder bei dem Gelände von Terroristen übernommen werden.

In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass manche Experten bei verstärktem militärischen Schutz von Atomanlagen eine Eskalation der Gewalt befürchten. Ein derartiger Schutz könnte als Reaktion dazu führen, dass Terroristen zum Einsatz von Massenvernichtungswaffen übergehen [Braun et al. 2002].

Gegen manche Arten von Angriffen sind militärische Einrichtungen direkt auf dem Anlagengelände überdies weitgehend wirkungslos, weil u. U. keine Vorwarnzeit besteht – etwa bei einem Angriff mit (legal leicht zu beschaffenden) Business Jets oder Helikoptern. Ein Angriff insbesondere mit Hubschrauber(n) kann in Baumwipfelhöhe erfolgen und mit Radar nicht erfassbar sein.

Die Innentäter-Problematik ist von besonderer Komplexität. Durch die zurzeit herrschende Knappheit an qualifiziertem Personal und den extensiven Einsatz von Fremdfirmen insb. bei Revisionsarbeiten werden die „Chancen“ von Terror-Organisationen, Innentäter zu rekrutieren, deutlich erhöht. Die Effektivität der internen Überwachung der Angestellten hängt dabei wesentlich von der internen Arbeitsorganisation und von den konkreten Maßnahmen ab, die der Arbeitgeber zur laufenden Überwachung und Kontrolle der Mitarbeiter/innen setzt.

5.6 *Fazit*

Die Bedrohung von Atomanlagen durch Terrorangriffe und Kriegseinwirkungen lässt sich wie folgt zusammenfassend charakterisieren:

- Kernkraftwerke stellen wegen ihrer Bedeutung für die Stromversorgung „attraktive“ Ziele sowohl für terroristische als auch für kriegerische Angriffe dar.
- Verschiedene Arten von Atomanlagen sowie Atomtransporten können wegen ihres Symbolcharakters sowie wegen der schwerwiegenden Folgen radioaktiver Freisetzungen zu Zielen terroristischer Angriffe werden.
- Alle Arten von Atomanlagen sind gegenüber Terrorangriffen und Kriegseinwirkungen verwundbar.
- Ein Angriff auf ein Kernkraftwerk kann zu radioaktiven Freisetzungen führen, die ein Mehrfaches jener beim Unfall im Atomkraftwerk Tschernobyl im Jahr 1986 erreichen. Umsiedlungen auf großen Flächen (im schlimmsten Fall über 100.000 km²) können erforderlich werden, die Zahl der Krebstoten kann 1 Million und mehr erreichen.
- Auch Angriffe auf andere Atomanlagen, beispielsweise Zwischenlager, können zu schwerwiegenden Freisetzungen mit katastrophalen Folgen führen.
- Die Transporte verschiedener Stoffe, die im Rahmen der Kernenergienutzung in großen Mengen anfallen, sind ebenfalls gegenüber Terrorangriffen verwundbar. Ein Anschlag auf einen Uranhexafluorid-Transport etwa, der in einem Ballungsraum stattfindet, kann kurzfristig zu Tausenden Toten und Verletzten führen.

- Schutzmaßnahmen gegen Terror-Angriffe sind nur in sehr begrenztem Maße möglich. Überdies sind verschiedene denkbare Maßnahmen (z. B. militärischer Schutz von Anlagen, verstärkte Überwachung und Kontrollen aller denkbaren Verdächtigen) in einer offenen und demokratischen Gesellschaft kaum durchführbar.
- Gegen kriegerische Einwirkungen, insbesondere Angriffe mit schweren Waffen, ist kein Schutz möglich.

Daher sind Atomanlagen verletzlich durch kriegerische und terroristische Aktivitäten und werden es bleiben, unabhängig davon welche Schutzmaßnahmen getroffen werden. Der einzig wirklich sichere Schutz ist der Ausstieg aus der Atomkraftnutzung.

Eine ideale Gesellschaft, in der die Ursachen für Instabilität, Krieg und Terrorismus weltweit eliminiert sind, könnte Atomkraftwerke ohne nennenswerte Risiken der oben beschriebenen Art betreiben. Die gegenwärtige Gesellschaft ist jedoch von diesem Idealzustand weit entfernt. In der Tat scheint die globale Entwicklung in die Gegenrichtung zu gehen. Die Kluft zwischen armen und reichen Ländern und Personen wächst, die Zahl der bewaffneten Auseinandersetzungen nimmt zu, die Grenze zwischen Terrorismus und Kriegshandlungen verschwimmt, sodass internationale Abkommen zum Schutz von Atomkraftwerken ihre Wirksamkeit verlieren, usw.. Eine zentrale Frage ist daher: Welche Industrie- und Energiesysteme kann sich diese Gesellschaft aus dem Blickwinkel der Sicherheit leisten?

Offensichtlich machen große, zentrale für die Wirtschaft wesentliche Einrichtungen, die Gesellschaft verletzlich. Wenn – wie im Fall von Atomanlagen – eine Gesellschaft nach einem Angriff nicht nur mit dem Verlust der Leistungen der Anlage fertig werden muss, sondern auch mit beträchtlichen Gesundheits- und Umweltproblemen, muss die Vertretbarkeit des Risikos des Betriebes einer solchen Anlage in Frage gestellt werden. Es ist nicht nur legitim diese Frage zu stellen; angesichts der neueren globalen Entwicklungen ist es sogar notwendig, diesen Fragen ernsthaft Aufmerksamkeit zu widmen. Im Energiebereich sind alternative Lösungen verfügbar. Der „sanfte“ Pfad, mit größtmöglicher Nutzungseffizienz sowie dem Einsatz erneuerbarer Energiequellen, ist mit Energiebereitstellung in vielen kleinen dezentralen Anlagen verbunden, so dass die Abhängigkeit von einer einzelnen Anlage gering ist. Das System als Ganzes ist weniger Verletzlich als „harte“ Systeme, wie z.B. die nukleare Option. „Sanfte“, nachhaltige Energiesysteme sind deshalb auch weniger attraktive Angriffsziele. Sollte dennoch ein Angriff erfolgen, würde er in der Regel nicht zu dramatischen Folgen für Menschen und Umwelt führen. Solche Systeme können daher Nachhaltigkeitskriterien auch angesichts terroristischer und kriegerischer Angriffe erfüllen, während die nukleare Option dies nicht kann.

Schließlich sei angemerkt, dass ein „sanftes“ Energiesystem, das keine „dual-use“ Technologie (zivile und militärische Nutzung) umfasst, das keine verlockenden Ziele für terroristische und militärische Angreifer bietet und das daher keine umfangreichen Schutzmaßnahmen erforderlich macht, auch einen Beitrag zur internationalen und gesellschaftlichen Entspannung leisten könnte.

5.7 Literaturhinweise und Anmerkungen

Albrecht, I. et al. (1988): Gutachten über die Gefährdung durch den Transport radioaktiver Güter auf dem Gebiet der Hansestadt Lübeck; erstellt von der Gruppe Ökologie Hannover im Auftrag der Hansestadt Lübeck, Juni 1988

Becker, O. und Hirsch, H. (2006): Schwere Unfälle im AKW Esenshamm und ihre Folgen – Schwerpunkt Terrorgefahren; Studie im Auftrag des Landesverbandes Niedersachsen und des Kreisverbandes Wesermarsch von Bündnis 90/Die Grünen, Hannover, April 2006

BMU (2002): Schutz der deutschen Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der terroristischen Anschläge in den USA vom 11. September 2001 – Ergebnisse der GRS-Untersuchungen aus dem Vorhaben „Gutachterliche Untersuchungen zu terroristischen Flugzeugabstürzen auf deutsche Kernkraftwerke“; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, 27.11.2002

BMU (2005): Schreiben von Staatssekretär R. Baake Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) an W. Hohlefelder, E.ON Energie AG, mit Anlage, Bonn, 07. September 2005

Braun, Ch., Steinhäusler, F. and Zaitseva, L.: (2002): International Terrorists' Threat to Nuclear Facilities; Presentation at the American Nuclear Society 2002 Winter Meeting, Washington D.C., November 19, 2002

Deutsche Bundesregierung (2004): Sicherheit von kerntechnischen Anlagen; Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der FDP, Drucksache 15/2829, 31.03.2004

Deutsche Bundesregierung (2006): Gefahren der Atomenergie; Antwort der Deutschen Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen, Drucksache 16/724, 13.04.2006

Financial Times Deutschland (2004): Trittin rügt Lücken im Terrorschutz für AKW; Financial Times Deutschland, 27.07.2004

FR (2006): Karlsruhe kippt Gesetz zu Flugzeug-Abschuss; Artikel in Frankfurter Rundschau, 16. Februar 2006

Hahn, L. (1999): Kernkraftwerke der Welt – Bestand, Funktionsweise, Sicherheitsprobleme; in: Gefahren der Atomkraft; Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein, 2. aktualisierte Auflage, Kiel, Mai 1999

Hirsch, H. et al. (1997): Extended Safety Review for Krsko NPP; Institute of Risk Rresearch of the Academic Senate of the University of Vienna, Risk Research Report Nr. 9, Vienna, November 1997

Hirsch, H. und Becker, O.: (2005): Vulnerability of Nuclear Power Plants to Terror Attacks – An Overview; Proceedings of the Conference “Nuclear Energy and Security“ (NUSEC), University of Salzburg (Austria), 20-23 July 2005

Meister, F. et al. (2002): Grenzüberschreitende UVP gemäß Art. 7 UVP-RL zum Standortzwischenlager Biblis; Bericht an das Österreichische Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, sowie an die Landesregierungen von Oberösterreich und Vorarlberg, Umweltbundesamt, Wien, Februar 2002

Münkler, H. (2003): Die neuen Kriege; Büchergilde Gutenberg, Frankfurt/Main, Wien und Zürich, 2003

Nucleonics Week (1994): Ignalina Sabotage Deadline Passes Without Blow-Up, Bomb Not Found; newsletter article, Nucleonics Week, Washington, DC, November 17, 1994

Nucleonics Week (1995): U.S. Intelligence Warns Against Chechnyan Attacks on Reactors; newsletter article, Nucleonics Week, Washington, DC, December 22, 1995

Nucleonics Week (2004): Nucleonics Week Vol. 45, No. 32, August 5, 2004

Nucleonics Week (2006): Nucleonics Week Vol. 47, No. 36, September 7, 2006

OECD NEA (1996): Chernobyl – Ten Years On: Radiological and Health Impact; OECD Nuclear Energy Agency, Paris 1996

Project on Government Oversight (2002): Nuclear Power Plant Security – Voices from Inside the Fences; Washington, revised October 2, 2002

Service Employees International Union (2002): Homeland Insecurity – How the Wackenhut Corporation is Compromising America's Nuclear Security; Service Employees International Union, Washington, April 2004

Thompson, G. (1995): War, terrorism and nuclear power plants; study commissioned by Greenpeace Germany, Institute for Resource and Security Studies, Cambridge/Mass., USA, Dezember 1995

Thompson, G. (2003): Sellafield – a Safe Future? Presentation to a Working Group of the European Parliament, Brussels, 26.03.2003

URENCO (2001): Uranhexafluorid-Transporte; URENCO Deutschland, 1. Auflage, Gronau/Jülich, März 2001

USNRC (1993): Status Report from NRC Incident Investigating Team; U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC, February 10, 1993

6 Katastrophenschutz

Helmut Hirsch

Juni 2005, geringfügige Aktualisierungen September 2006

Inhaltsverzeichnis

6	Katastrophenschutz	140
6.1	Einführung	140
6.2	Vorkehrungen für den Katastrophenschutz	141
6.3	Wenn der Ernstfall eintritt	142
6.4	Internationale Bemühungen – die weitgehende Hilflosigkeit bleibt	145
6.5	Erfahrungen: Harrisburg, Tschernobyl, Tokai Mura...	147
6.5.1	Three Mile Island – „blinde Männer“ treffen Entscheidungen	147
6.5.2	Tschernobyl – Unfallfolgen über Tausende Kilometer und viele Jahrzehnte	148
6.5.3	Tokai Mura – ein Unfall in dicht besiedeltem Gebiet	149
6.6	Fazit	151
6.7	Literaturhinweise	153

6 Katastrophenschutz

6.1 Einführung

Der Reaktor eines Kernkraftwerkes enthält große Mengen hochgiftiger radioaktiver Schadstoffe. Bei einem schweren Unfall kann ein nennenswerter Teil dieser gefährlichen Substanzen in die Atmosphäre verfrachtet werden.

Die Freisetzungen von Tschernobyl illustrieren dies: Es gelangte unter anderem das gesamte Inventar an radioaktiven Edelgasen nach außen (6,5 Milliarden GBq – 1 Gigabecquerel (GBq) entspricht einer Milliarde Becquerel), 50 bis 60 % des radioaktiven Jod (1,76 Milliarden GBq), 25 bis 60 % von Tellur-132 (1,15 Milliarden GBq), 20 – 40 % des radioaktiven Cäsium (140 Millionen GBq), 4 – 6 % von Strontium-90 und rd. 3,5 % des Inventars einer der gefährlichsten radioaktiven Substanzen überhaupt, Plutonium [OECD NEA 2002].

Bei einem Kernschmelzunfall in einem Druckwasserreaktor in Westeuropa, den USA oder einem anderen Staat können die Freisetzungen vergleichbar oder noch etwas höher sein, wenn er mit frühzeitigem Versagen oder by-pass des Containments verbunden ist. Dies kann beispielsweise durch eine Wasserstoffexplosion oder durch den Ausstoß der Schmelze aus dem Reaktor-druckbehälter bei hohem Innendruck verursacht werden. Von Jod, Cäsium und Tellur könnten in diesem Falle 50 bis 90 % in die Umgebung gelangen [Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein 1999].

Gerade bei Unfällen mit besonders schweren Freisetzungen gelangt die radioaktive Wolke schon wenige Stunden nach Unfallbeginn in die Atmosphäre. Die Vorwarnzeit, die für Maßnahmen des Katastrophenschutzes zur Verfügung steht, kann sehr gering sein. Dies gilt auch noch für größere Entfernungen. Schon bei Windgeschwindigkeiten von nur 20 Stundenkilometern, wie sie in Europa häufig auftreten, kann die Wolke innerhalb eines Tages rund 500 Kilometer zurücklegen und damit beispielsweise kleinere europäische Staaten wie Österreich komplett überqueren.

Die Strahlenbelastung der Bevölkerung nach einem solchen Unfall kann sogar zu akuten Strahlenschäden (Strahlenkrankheit und Tod innerhalb weniger Wochen) führen. Auf jeden Fall könnten Millionen von Menschen von den Langzeitwirkungen betroffen sein. Ihnen drohen Krebs und andere Erkrankungen sowie Veränderungen des Erbgutes (Mutationen).

Schwere Unfälle mit radioaktiven Freisetzungen sind nicht nur in Kernkraftwerken möglich. Sie können auch in anderen Atomanlagen eintreten, wie etwa in Wiederaufarbeitungsanlagen oder Anlagen zur Brennstoffherstellung. Auch beim Transport radioaktiver Stoffe kann es zu hohen unfallbedingten Freisetzungen kommen, die u. U. noch im Abstand von mehreren Kilometern Gegenmaßnahmen erforderlich machen [Deppe et al. 1992]. Die besondere Problematik derartiger Unfälle liegt darin, dass sie praktisch an jedem Punkt von Transportstrecken eintreten können, die oftmals mehrere hundert Kilometer lang sind.

All dies belegt bereits, dass Kernenergie weder umwelt- noch sozialverträglich ist.

Diese Problematik hat sich in den letzten Jahren noch verschärft. Soweit absehbar, wird sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen. Die Gefahr von Terror-Anschlägen und Kriegseinwirkungen auf

nukleare Anlagen nimmt zu – damit auch das Risiko von katastrophalen radioaktiven Freisetzungen mit geringer Vorwarnzeit. Weiterhin besteht ein steigender Trend bei der Wahrscheinlichkeit von Naturkatastrophen, die durch den anthropogenen Klimawandel bedingt sind. Überschwemmungen, Wirbelstürme, extreme Temperaturen erhöhen ebenfalls das Risiko nuklearer Unfälle.

Andererseits ist festzuhalten, dass die Darstellungen in diesem Beitrag von den gegenwärtig weltweit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerkstypen ausgehen. Über mögliche zukünftige Reaktorgenerationen, die gegenüber den heutigen Anlagen qualitativ verbessert sind, werden hier keine Aussagen gemacht.

6.2 Vorkehrungen für den Katastrophenschutz

Um für den Ernstfall vorbereitet zu sein, ist eine Vielzahl der unterschiedlichsten Maßnahmen erforderlich. Diesen Aufwand müssen nicht nur Staaten leisten, auf deren Gebiet Kernkraftwerke und andere Atomanlagen betrieben werden, da die Auswirkungen grenzüberschreitend sein können.

Von Kernkraftwerken im benachbarten Ausland geht die gleiche Bedrohung aus wie von solchen im eigenen Land. Dies ist allgemein anerkannt und wird beispielsweise durch folgendes Zitat aus den deutschen Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz illustriert:

„Bei ausländischen kerntechnischen Anlagen, die sich in der Nähe der deutschen Grenze befinden, müssen die gleichen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung durchgeführt werden können wie bei deutschen Anlagen.“ [Länderausschuss für Atomkernenergie 1999]

Eine vollständige Darstellung der erforderlichen Vorkehrungen kann hier nicht gegeben werden. Schon eine beispielhafte Aufzählung zeigt jedoch, welcher großer Aufwand hier in den verschiedensten Bereichen betrieben werden muss.

- Vorbereitung von Schutzräumen, Planung von Schutz außerhalb dieser Räume (in Wohnungen, Arbeitsstätten, Schulen usw.)
- Errichtung eines Frühwarnsystems mit einer ausreichenden Zahl von Messstellen, Koppelung mit den entsprechenden Systemen anderer Länder
- Aufbau eines Warn- und Alarmsystems für die Bevölkerung, sowie eines Informationssystems
- Planungen für die Bevorratung von Lebensmitteln unter Berücksichtigung besonders gefährdeter Personen und hilfsbedürftiger Menschen
- Vorbereitung der Anwendung von Jodprophylaxe (Bevorratungs- und Verteilungssystem für Jodtabletten)
- Vorbereitung von Dekontaminations-Einrichtungen
- Planungen und Einrichtungen für die Behandlung von verstrahlten und möglicherweise kontaminierten Menschen

- Planungen von Evakuierungs- und anderen Maßnahmen: Schaffung der rechtlichen Grundlagen, Erstellen konkreter Evakuierungspläne, Schulung der Öffentlichkeit und Ausbildung der Helfer

Sämtliche Maßnahmen und Planungen müssen laufend aktualisiert und dem neuesten Stand der Bevölkerungsverteilung und –struktur, der Verkehrswege, der medizinischen Erkenntnis, der technischen Möglichkeiten usw. angepasst werden. Die Inbetriebnahme neuer Atomanlagen kann umfangreiche Ergänzungen und Überarbeitungen erforderlich machen.

Diese Vorkehrungen sind, wie gesagt, auch für Staaten zwingend, die keine Kernkraftwerke betreiben. Sie stellen keine einmalige Belastung dar, sondern einen Jahr für Jahr anfallenden Aufwand. Es handelt sich um eine umfassende Infrastruktur, die hier erhalten und nach Bedarf modifiziert sowie – insbesondere bei einem weiteren weltweiten Ausbau der Kernenergie – auch ausgebaut werden muss.

Diese Kosten werden von der öffentlichen Hand getragen, und werden bei der Berechnung der Stromkosten aus Kernkraftwerken meist nicht berücksichtigt.

6.3 Wenn der Ernstfall eintritt

Selbst bei optimaler Planung für den Katastrophenschutz ist zu befürchten, dass die rechtzeitige Umsetzung vieler Maßnahmen gerade im Nahbereich, der am stärksten gefährdet ist, aufgrund der kurzen Vorwarnzeiten nicht möglich ist. Dabei kann dieser „Nahbereich“, der innerhalb einiger Stunden von der radioaktiven Wolke erreicht wird, durchaus noch Landstriche in hundert Kilometer Entfernung und mehr einschließen.

Sobald bekannt wird, dass die Lage in einem Kernkraftwerk außer Kontrolle geraten ist und ein Unfallablauf begonnen hat, stellen sich die ersten Fragen: Wann ist mit Freisetzungen zu rechnen, wie gravierend werden die Freisetzungen sein und in welche Richtung wird die Wolke ziehen?

Vorhersagen können sehr schwierig sein und werden immer große Ungenauigkeiten aufweisen. Dennoch müssen Entscheidungen getroffen werden. Es geht zuallererst um die Information der Öffentlichkeit. Die Vorteile einer raschen Warnung im Katastrophenfall, die es gestatten kann, die Strahlenbelastung der Bevölkerung zu reduzieren, müssen gegen die möglichen Folgen abgewogen werden, die ein unnötiger Alarm haben kann, besonders, wenn es zu Panik in der Bevölkerung kommt.

Unverzüglich muss auch über die Einleitung von Maßnahmen entschieden werden. Soll die Bevölkerung aufgefordert werden, in den Häusern zu bleiben bzw. möglichst Schutzräume aufzusuchen? Muss eine Evakuierung vorbereitet werden? Sollen Jodtabletten ausgegeben werden?

Diese Überlegungen laufen vor dem Hintergrund ab, dass unter Umständen die Situation im betroffenen Kernkraftwerk sehr unübersichtlich ist. Die Verhältnisse innerhalb des Reaktorgebäudes sind wahrscheinlich nicht genau bekannt. Messgeräte zur Überwachung der Ausbreitung radioaktiver Stoffe können ausfallen, oder sie liefern möglicherweise keine verlässlichen Werte bzw. geben ein widersprüchliches Bild.

Selbst die kurzfristige Vorhersage der Windverhältnisse ist schwierig. In Frankreich wurde ein aufwändiges System für den Katastrophenfall entwickelt, das u. a. die Prognose der radiologischen Folgen gestatten soll. Selbst unter diesen Voraussetzungen – die bei weitem nicht in jedem Staat gegeben sind – bleiben aber noch erhebliche Ungenauigkeiten bei den Vorausbestimmungen:

„... tests performed on some of the French nuclear sites have shown that the prediction [of wind direction] could be done with an uncertainty of $\pm 30^\circ$ with a confidence level lower than 70 per cent on rather complex terrains.“ [Herviou & Winter 1999]

Die Identifizierung eines Sektors mit einem Öffnungswinkel von 60° , wobei die Wahrscheinlichkeit des Zutreffens unter 70 % liegt, stellt eine wenig belastbare Basis für die Umsetzung von Maßnahmen dar.

Verschlimmert wird die Situation durch die altbekannte Tatsache, dass Radioaktivität mit den menschlichen Sinnen nicht wahrnehmbar ist. Daher kann es nicht überraschen, wenn es zu Stress, Panik und irrationalen Verhalten von Menschen kommt – wobei das Einsatzpersonal und die verantwortlichen Katastrophen-Manager durchaus einzuschließen sind.

Selbst von diesen Problemen abgesehen, wird es im Katastrophenfall sehr schwierig sein, Gegenmaßnahmen wie geplant umzusetzen, unter anderem weil die zur Verfügung stehende Zeit begrenzt ist.

Dies betrifft beispielsweise die Einnahme von Jodtabletten, durch die die Schilddrüse mit Jod gesättigt und damit die Belastung durch radioaktives Jod weitgehend abgeblockt werden soll. Dies sollte naturgemäß vor dem Durchzug der radioaktiven Wolke oder während des Durchzugs geschehen:

„Der Schutz ist dann am wirksamsten, wenn die Jodtabletten kurz vor oder praktisch gleichzeitig mit dem Einatmen von radioaktivem Jod eingenommen werden. Aber auch wenige Stunden nach dem Einatmen von radioaktivem Jod wird noch ein gewisser Schutz erzielt. Später als ein Tag nach der Aufnahme des radioaktiven Jods schützt die Einnahme von Jodtabletten nicht mehr; sie ist dann eher schädlich.“ [Strahlenschutzkommission 2004]

In Deutschland soll die Abgabe der Tabletten an die Haushalte im Umkreis von bis zu 25 km um ein Kernkraftwerk innerhalb von 2 bis 4 Stunden nach der Entscheidung abgeschlossen sein, in gefährdeten Gebieten bis etwa 100 km Entfernung innerhalb von 12 Stunden [Länderausschuss für Atomkernenergie 1999]. Es ist mehr als fraglich, ob diese Vorgaben tatsächlich eingehalten werden können.

Davon abgesehen kann die radioaktive Wolke im schlimmsten Fall Orte in 25 km Entfernung von der betroffenen Anlage schon innerhalb von ca. 3 Stunden nach Beginn des Unfallablaufes erreichen, da Kernschmelze und Versagen des Containments u. U. bereits nach 2 Stunden eintreten können. Je nach Windgeschwindigkeit kann die Wolke nur wenige Stunden später auch an Orten in 100 km Entfernung ankommen.

Die Einnahme von Jodtabletten kann bei anfälligen Personen auch Schäden hervorrufen (z. B. auslösen einer Schilddrüsenüberfunktion). Erfolgt sie also insgesamt zu spät, können die negativen Wirkungen die Schutzwirkung überwiegen.

Dennoch wurde in Deutschland die von den Bundesländern vorsorglich gelagerte Menge an Jodtabletten kürzlich vorsorglich erhöht. Diese Entscheidung wurde wohl auch im Hinblick auf die Terrorgefahr getroffen – obwohl gerade in diesem Falle zu befürchten ist, dass die Vorwarnzeit besonders kurz ist und somit besonders schlechte Voraussetzungen für die rechtzeitige Einnahme der Tabletten bestehen [Strahlentelex 2004, Energy News 2004].

Eine andere Maßnahme, der Aufenthalt in Gebäuden, soll im Katastrophenfall dem Schutz gegen die äußere Bestrahlung aus der Wolke sowie zum Schutz gegen Inhalation radioaktiver Schadstoffe dienen. Die beste Schutzwirkung besteht im Aufsuchen von Kellern, doch auch diese Maßnahme bietet nur begrenzt Schutz, da auch die Kellerluft mit der Zeit kontaminiert wird. Das Aufsuchen von Schutzräumen ist nur als zeitlich begrenzte Maßnahme gedacht, während die Wolke durchzieht, mit anschließender Umsiedelung, wo infolge hoher Kontamination erforderlich.

Dies führt zu problematischen Zielkonflikten: Es ist gleichzeitig erforderlich, dass die zu schützende Bevölkerung für Rundfunk- und Lautsprecherdurchsagen erreichbar bleibt, was im Keller nicht ohne weiteres gewährleistet ist. Außerdem sind unter Umständen gerade in der kritischsten Phase (während des Durchzuges der Wolke) viele Menschen unterwegs, um die oben erwähnten Jodtabletten abzuholen. Dementsprechend heißt es auch in den deutschen Rahmenempfehlungen:

„Der Aufenthalt in Gebäuden ist eine einfache und effektive Katastrophenschutzmaßnahme, die jedoch nur über kurze Zeit aufrechterhalten werden kann.“ [Länderausschuss für Atomkernenergie 1999]

Bei zu befürchtender starker Verstrahlung stellt die Evakuierung die drastischste Schutzmaßnahme dar. Auch dabei ist rechtzeitiges Handeln entscheidend. Die deutschen Rahmenempfehlungen stellen lakonisch fest:

„Die Evakuierung ist besonders dann eine wirkungsvolle Maßnahme, wenn sie vor Durchzug der radioaktiven Wolke erfolgt.“ [Länderausschuss für Atomkernenergie 1999]

Wie dies in der Praxis, insbesondere in betroffenen Großstädten, funktionieren soll, muss offen bleiben. Schon allein das Problem, alle hilfsbedürftigen Menschen (Behinderte, Alte, Kranke...) in einer Stadt aufzufinden und rechtzeitig in angemessener Form abzutransportieren, dürfte unlösbar sein. Ebenso wenig wird es möglich sein, im Zeitalter der Übermotorisierung die vollständige Verstopfung sämtlicher Verkehrsadern und Ausfallstraßen zu vermeiden.

Schließlich ist zu bedenken, dass Evakuierungen, soweit sie durchgeführt werden können, zu weiteren schwerwiegenden Belastungen der betroffenen Menschen führen. Diese müssen, möglicherweise für lange Zeiträume, in Notunterkünften untergebracht werden; in diesen „Auffangräumen“ kann es zu psychischem Stress und sozialen Spannungen kommen. Arbeitsplätze sind verloren, Ausbildung und Schulbesuch in Frage gestellt. Ganze Städte werden als funktionierende soziale Einheiten ausgelöscht, Nachbarschaften und sogar Familien werden zerrissen.

Erschwert wird die rasche und gezielte Durchführung von Maßnahmen des Katastrophenschutzes noch dadurch, dass die Planungen und Richtlinien in verschiedenen Staaten zum Teil erheblich voneinander abweichen. Sogar innerhalb der Europäischen Union bestehen nennenswerte Unterschiede. Dieser Punkt ist von großer Bedeutung, da nukleare Unfälle im Allgemeinen grenzüberschreitende Auswirkungen haben werden.

Bei den bereits genannten Jod-Tabletten beispielsweise gibt es in Belgien, Deutschland, Frankreich und Luxemburg Richtwerte für die zu erwartende Dosis, ab der Kinder Tabletten erhalten sollen, die um bis zu einem Faktor zehn voneinander abweichen. Auch im Hinblick auf die Zonen der Verteilung bestehen Unterschiede. Die Regelungen sind in jedem der vier genannten, benachbarten Länder unterschiedlich. Es ist kurz- und mittelfristig nicht zu erwarten, dass sie aneinander angeglichen werden [Feider 2004].

Es kann nicht verwundern, wenn eine deutsche Landesregierung als oberste zuständige Katastrophenschutzbehörde bei einem nuklearen Unfall zu folgender Schlussfolgerung kommt:

„Die schleswig-holsteinische Landesregierung ist jedoch der festen Überzeugung, daß die bestmögliche Vorsorge gegen den Unfall eines Atomreaktors darin besteht, diesen Reaktor gar nicht erst zu betreiben. Die Folgen einer nuklearen Katastrophe wären so unermesslich, daß ein Verzicht auf diese Form der Energiebereitstellung das Ziel staatlichen Handelns sein muß.“ [Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein 1999]

6.4 Internationale Bemühungen – die weitgehende Hilflosigkeit bleibt

Um die Entscheidungsfindung und Planung von Maßnahmen im Falle einer nuklearen Katastrophe zu verbessern, wurde in einer gemeinsamen Anstrengung von 20 Staaten der Europäischen Union, Osteuropas und der ehemaligen Sowjetunion das System RODOS (Real-time On-line DecisiOn Support system for off-site emergency management in Europe) entwickelt. Dieses System soll Informationen über die bestehende und zukünftige radiologische Situation, Informationen zur Bewertung von Gegenmaßnahmen sowie methodische Hilfen für die Entscheidungsfindung bieten.

Es handelt sich dabei um einen Ansatz, der zweifellos das Potenzial aufweist, Verbesserungen zu erbringen. Das System ist allerdings sehr komplex; die Entwicklung und Einführung sind sehr zeitaufwändig und immer noch nicht abgeschlossen. Das Projekt begann bereits 1989. Zurzeit läuft die Installation des RODOS-Systems in osteuropäischen Staaten noch. Bis 2004 wurde es in Ungarn, Polen, der Slowakischen Republik und der Ukraine eingeführt. Die Installation in Bulgarien, der Tschechischen Republik, Rumänien und Russland ist noch im Gange [Forschungszentrum Karlsruhe 2003]. Eine Bewertung seiner Vorteile und Grenzen wird erst möglich sein, nachdem die Einführung abgeschlossen und umfassende Tests und Übungen durchgeführt wurden. Auch dann muss letztlich die Frage offen bleiben, wie es sich im Ernstfall bewährt. Außerdem beruht auch das RODOS-System auf umfassenden Prognose-Modellen, u. a. für die meteorologischen Verhältnisse, deren Vorhersagegenauigkeit begrenzt ist. Sämtliche Informationen und Entscheidungshilfen, die RODOS liefert, können aber nur so exakt und belastbar sein, wie die Modelle, auf denen sie beruhen.

Im November 2002 wurde von der IAEO gemeinsam mit sechs anderen internationalen Organisationen ein neuer Bericht im Rahmen der „Safety Standards Series“ herausgegeben, der die Anforderungen für Vorausplanung und Reaktion im Falle eines nuklearen Notfalles festlegt. Es handelt sich um das erste Papier im internationalen Rahmen, das einen umfassenden und zusammenfassenden Charakter besitzt und den zuständigen nationalen Behörden die Möglichkeit geben soll, Fragen des Katastrophenschutzes in ihrer Gesamtheit zu sehen – wenn es sich auch noch auf einer relativ allgemeinen Ebene bewegt [IAEA 2002].

Eine solche Bemühung zur Vereinheitlichung der Anforderungen an den Katastrophenschutz kann grundsätzlich nur begrüßt werden. Die Hilflosigkeit, die angesichts einer nuklearen Katastrophe letztlich trotz aller Planungen und Festlegungen in erheblichem Maße bestehen bleibt, spiegelt sich jedoch auch im Text dieses Berichtes wieder.

Dies zeigt sich beispielsweise bei der Forderung, dass Rettungspersonal bei der Bergung von Menschen Hinweise auf die Anwesenheit radioaktiver Stoffe ignorieren soll – und sich damit u. U. einer sehr hohen Strahlenbelastung aussetzt. Weiterhin wird ausgeführt, dass vorbeugende Schutzmaßnahmen vor der Freisetzung von Radioaktivität oder zumindest knapp danach erfolgen sollen; eine Forderung, auf deren Problematik bereits hingewiesen wurde. Besonders bei Terror- oder kriegerischen Angriffen wird sie schwer zu erfüllen sein; ebenso in Fällen, in denen das Personal in der Anlage zunächst davon ausgeht, die Situation noch unter Kontrolle zu bekommen.

Das Personal soll nachträglich über die erhaltene Dosis informiert werden; deren Rekonstruktion wird jedoch nicht immer möglich sein. Überhaupt zeigt sich die Unmöglichkeit, für Rettungspersonal verbindliche Grenzwerte festzulegen. Die Dosis soll möglichst unter dem Doppelten der sonst zulässigen Jahresdosis bleiben, es sei denn bei der Rettung von Leben – in diesem Fall gilt das Zehnfache der Jahresdosis als Grenze. Doch auch diese kann unter bestimmten Umständen überschritten werden.

Diese Aufzählung könnte noch fortgesetzt werden. Sie stellt keine Kritik an dem Bericht der IAEA und der anderen internationalen Organisationen dar. Es ist schlechthin nicht möglich, Anforderungen für den Fall nuklearer Katastrophen aufzustellen, die zuverlässig eingehalten werden könnten. Auch praktische Übungen, wie sie im Rahmen der Katastrophenschutzplanung bereits durchgeführt wurden, können hier nur zum Teil Abhilfe schaffen.

In Kapitel 5 des Dokumentes werden die Anforderungen an die Infrastruktur festgelegt. Es wird auch hier wieder deutlich, wie umfassend der Aufwand ist, der vorbereitend durchgeführt werden muss – wegen der weiträumigen Auswirkungen von Unfällen auch von Staaten, auf deren Gebiet keine Kernkraftwerke betrieben werden.

Insgesamt verbleiben auch Mitte 2006 noch viele offenen Probleme. Diese betreffen sogar jene Maßnahmen, die im Prinzip eingeführt werden könnten, um die Auswirkungen einer nuklearen Katastrophe etwas abzumildern. Ein Vertreter der IAEA kommt zu folgenden Schlussfolgerungen:

„Many member states are currently not adequately prepared to respond to such [radiological] emergency situations. Moreover, without standard procedures and common approaches, protective actions can differ between countries, resulting in confusion and mistrust among the public, interfering with recovery operations and possible leading to severe socioeconomic and political consequences. Many of the lessons from past accidents, including even the Three Mile Island and Chernobyl accidents, have still not been completely incorporated into emergency plans in all States. Furthermore, there is a heightened awareness of the need to strengthen arrangements to respond to emergencies that could arise from criminal or terrorist activities involving nuclear and other radioactive materials.“ [de Oliveira 2006]

6.5 Erfahrungen: Harrisburg, Tschernobyl, Tokai Mura...

6.5.1 Three Mile Island – „blinde Männer“ treffen Entscheidungen

Der Unfall in dem Atomkraftwerk Three Mile Island am 28. März 1979 führte zu erheblichen Freisetzungen radioaktiver Stoffe, verglichen mit den Emissionen im Normalbetrieb. Glücklicherweise wurde das Containment nicht zerstört; die große Katastrophe blieb aus.

Three Mile Island kann aber als Lehrstück dafür dienen, wie bei einem nuklearen Unfall für mehrere Tage eine völlig unklare und unübersichtliche Situation entstehen kann.

Am 30. März erreichte die Verwirrung ihren Höhepunkt. Aus der Anlage kamen keine eindeutigen Informationen. Während die Temperatur des Reaktorkerns stieg, fielen einige Messstellen aus und Radioaktivität wurde freigesetzt. Die weitere Entwicklung war nicht vorhersehbar (bzw. wurde jedenfalls von der Betriebsmannschaft nicht überblickt). Die Katastrophenschutzleitung erhielt daher die Empfehlung, eine Evakuierung in Betracht zu ziehen [Innenausschuss des Deutschen Bundestages 1979].

An diesem Tag sagte der Vorsitzende der obersten Kontrollbehörde NRC Joseph Hendrie über sich und den Gouverneur von Pennsylvania Richard Thornburgh:

„Wir tappen fast völlig im Dunkeln. Sein Wissensstand ist nicht-existent, und meiner ist unzureichend. Es ist so, als ob ein paar blinde Männer herumstolpern und Entscheidungen treffen.“
[May 1989]

Die Messfühler in den Abluftkaminen waren ausgefallen. Die Strahlenüberwachung in der Umgebung war lückenhaft; es gab nicht genug Messgeräte.

Vor allem aufgrund der drohenden Gefahr einer Wasserstoffexplosion wurden am 30. März 3.500 Kinder und schwangere Frauen aus dem 8 km-Umkreis des Atomkraftwerkes evakuiert. Insgesamt bis zu 200.000 Menschen verließen die Umgebung aus eigenem Antrieb.

Erst in der Folgewoche wurde die Lage allmählich übersichtlicher. Die geschlossenen Schulen wurden wieder geöffnet und der Bevölkerung wurde nahe gelegt, wieder nach Hause zurückzukehren. Doch es konnte nicht mehr zuverlässig ermittelt werden, wie groß die Freisetzungen radioaktiver Stoffe insgesamt tatsächlich waren.

Die gesundheitlichen Folgen des Unfalles wurden nur in geringem Maße untersucht. Es gibt Anzeichen für eine Erhöhung der Krebsrate in der Umgebung der Anlage, die kontrovers diskutiert wurden. Viele Fragen bleiben bis heute offen [Mangano 2004].

Seit diesem Unfall wurde der Katastrophenschutzplanung in den USA erheblich mehr Aufmerksamkeit geschenkt, vieles wurde weiterentwickelt, wesentliche Mängel wurden behoben.

Für das grundsätzliche Problem jedoch, dass bei einer Unfallsituation in einem Kernkraftwerk die vorliegenden Informationen unvollständig und verwirrend sein können und tagelang keine belastbare Grundlage für die Planung von Schutzmaßnahmen gegeben ist, wird es niemals eine vollständig befriedigende Lösung geben.

Auch heute können die ersten Entscheidungen der für den Katastrophenschutz Verantwortlichen im Ernstfall reine Glücks- (oder Unglücks-)sache sein.

6.5.2 Tschernobyl – Unfallfolgen über Tausende Kilometer und viele Jahrzehnte

Sieben Jahre nach Three Mile Island ereignete sich in einem Kernkraftwerk eine Katastrophe. Der Unfall von Tschernobyl am 26. April 1986 hat das Leben von Millionen Menschen dramatisch verändert. Hunderttausende Quadratkilometer Land wurden verstrahlt. Der offiziell angegebene wirtschaftliche Schaden liegt in der Größenordnung von einer Billion US-Dollar [Hille et al. 1996].

Welche Lehren für den Katastrophenschutz lassen sich aus diesem Ereignis ziehen?

Die erste Zeit nach dem Unfall war durch eine äußerst zögerliche Informationspolitik der sowjetischen Behörden gekennzeichnet – sowohl gegenüber der eigenen Öffentlichkeit, als auch dem Ausland. So wurde in der Ortschaft Pripjat in unmittelbarer Nachbarschaft des Atomkraftwerkes erst 36 Stunden nach dem Unfall vor der Strahlung gewarnt [UNOCHA 2000]. In vielen europäischen Staaten langte die radioaktive Wolke früher an als belastbare Informationen über den Unfall. Der erste Hinweis außerhalb der Sowjetunion auf den Unfall waren in der Tat erhöhte Werte der Radioaktivität im schwedischen Kernkraftwerk Forsmark.

Diese Probleme sind zum Teil nicht unvermeidbar. Nach dem Tschernobyl-Unfall wurden zwei internationale Konventionen ins Leben gerufen, über die frühzeitige Benachrichtigung bei Unfällen und über gegenseitige Hilfeleistung, die verbesserte Grundlagen für eine internationale Kooperation bieten [IAEA 1986a, b]. Darüber hinaus kam es zu zahlreichen bilateralen Abkommen sowie in vielen Staaten zu Verbesserungen auf dem Gebiet der Frühwarnsysteme und der Planung von Schutzmaßnahmen.

Tschernobyl lehrt aber auch, dass ein wesentlicher Teil der Folgen einer schweren atomaren Katastrophe selbst durch die beste Vorausplanung nicht vermieden werden kann. Eine Viertel-million Menschen wurde evakuiert; Millionen leben noch immer in stark verstrahlten Gebieten. Es wäre äußerst schwierig, für sie alle anderswo Platz zu finden.

Neue Städte mussten für die Evakuierten innerhalb kurzer Zeit errichtet werden. Sie wurden zu Brennpunkten sozialer Spannungen. Das Wirtschaftsleben funktioniert nicht reibungslos, die Arbeitslosigkeit ist hoch, die Menschen in diesen Städten sind von Subventionen abhängig.

Katastrophenplanung kann im günstigsten Fall Strahlenbelastung von Menschen mindern; gegenüber den sozialen Folgen eines Unfalles ist sie weitgehend hilflos.

Tschernobyl hat weiterhin gezeigt, wie großräumig die Auswirkungen eines Reaktorunfalls sein können. Noch über Hunderte, ja Tausende von Kilometern kam es zu Verstrahlungen, die Gegenmaßnahmen erforderten.

Sogar in den letzten Jahren wurden in Bayern hohe Werte der Cäsium-Kontamination bei Wild gemessen. Im Fleisch von Wildschweinen wurden 2004 bis zu 40.000 Bq/kg festgestellt, weit über dem deutschen Grenzwert von 600 Bq/kg [BFS 2006].

In den nordischen Ländern bleiben die Cäsium-Konzentrationen in Pilzen und Süßwasser-Fischen hoch, häufig im Bereich des zehnfachen bis zwanzigfachen des Grenzwertes von 1.500 Bq/kg.

Auch das Fleisch von Rentieren war hoch belastet; 2006 wird berichtet, es sei „überwiegend unterhalb der Grenzwerte“ [Nucleonics Week 2006].

In Großbritannien ist zu befürchten, dass Einschränkungen beim Verzehr von Lebensmitteln bis zum Jahr 2010 oder 2015 aufrechterhalten werden müssen [Smith et al. 2000].

Schließlich macht der Unfall von Tschernobyl auch deutlich, wie langfristig die Folgen einer atomaren Katastrophe wirksam sind.

Dies betrifft nicht nur die bereits erwähnten langfristigen Verzehrbeschränkungen in großer Entfernung vom Unfallort. Viele der Erkrankungen und Todesfälle treten mit erheblicher Zeitverzögerung auf.

Mangels systematischer Studien und Aufzeichnungen vor allem in den ersten Jahren nach 1986 kann ein Teil dieser Auswirkungen überhaupt nicht mehr genau erfasst werden. Und der Großteil der Folgen für Leben und Gesundheit von Menschen liegt noch in der Zukunft.

Eine umfassende Studie der Gesundheitsfolgen von Tschernobyl, die von 50 russischen und ukrainischen Wissenschaftlern zusammengestellt und zum zwanzigsten Jahrestag veröffentlicht wurde, kommt zu dem Schluss:

„Complete evaluation of the human health consequences of the Chernobyl accident is therefore likely to remain an almost impossible task, such that the true extent of morbidity and mortality resulting may never be fully appreciated.“ [Yablokov 2006]

In dieser Studie werden verschiedene Abschätzungen zur Zahl der Opfer von Krebs und anderen Krankheiten referiert. Die höchsten Werte gehen in die Millionen. Angesichts der verfügbaren Daten und Informationen erscheint es plausibel anzunehmen, dass die Zahl der Todesopfer im sechsstelligen Bereich liegen wird. Klarerweise sind die am stärksten betroffenen Länder Belarus, die Ukraine und Russland. Aber auch in anderen europäischen Ländern wurde Morbidität und Mortalität in bedeutsamen Umfang verursacht.

Selbst zum jetzigen Zeitpunkt können die Folgen des Unfalles noch weiter verschlimmert werden, wenn bereits freigesetzte radioaktive Stoffe weiter in der Umwelt verbreitet werden, etwa durch Auswaschen aus dem Boden oder bei Bränden kontaminierter Wälder, oder wenn noch mehr des radioaktiven Inventars vom Standort freigesetzt wird – beispielsweise aus den hastig ausgehobenen Gräben, in denen radioaktive Abfälle lagern, oder aus dem schwer beschädigten Reaktorgebäude.

Katastrophenschutzplanung müsste also, wenn die Aussicht bestehen soll, dass sie tatsächlich wirksam ist, nicht zuletzt langfristig angelegt werden und Jahrzehnte überspannen.

6.5.3 Tokai Mura – ein Unfall in dicht besiedeltem Gebiet

Der Kritikalitätsunfall in der Urankonversionsanlage der JCO (Japan Nuclear Fuel Conversion Company Ltd.) am 30. September und 01. Oktober 1999 hatte keine weitreichenden Auswirkungen. Andere Staaten waren nicht betroffen.

Ungeachtet dessen illustriert dieser Unfall die Schwierigkeiten, in einer dicht besiedelten Umgebung rechtzeitig Maßnahmen des Katastrophenschutzes zu treffen. Er macht auch deutlich, dass es nicht nur Kernkraftwerke sind, von denen eine nukleare Bedrohung ausgeht.

Die unkontrollierte Kettenreaktion in der Urankonversionsanlage begann am 30. September um 10 Uhr 35. Die Betriebsleitung erkannte innerhalb weniger Minuten, daß es zu einer Kritikalität gekommen war. Dennoch wurde die zuständige Behörde, die Science and Technology Agency, erst 40 Minuten später verständigt, die Stadtverwaltung von Tokai Mura erst um 11 Uhr 34 [Nucleonics Week 1999].

Erst vier bis fünf Stunden nach Beginn der Kritikalität wurden 150 Menschen aus dem 150 Meter-Umkreis der Anlage evakuiert. Etwa zur gleichen Zeit erhielten die 310.000 Einwohner im 10 Kilometer-Umkreis die Anweisung, in ihren Häusern zu bleiben [Nuclear Fuel 1999].

In den frühen Morgenstunden des 01. Oktober wurden weitere Evakuierungen erwogen. Die Behörden entschieden sich dagegen, weil es regnete und eine Panik befürchtet wurde. Die Kettenreaktion war zu diesem Zeitpunkt noch im Gange. Durch die Neutronen-Direktstrahlung aus der Anlage erreichte die Strahlenbelastung noch in 400 Metern Entfernung den Wert von einem Millisievert [WISE 1999].

Um 06 Uhr 30 am Morgen des 01. Oktober endete die Kritikalität und die Schutzmaßnahmen wurden in der Folge wieder aufgehoben.

Da ein Lüftungssystem in der Anlage zunächst weiter lief, wurde immer noch radioaktives Jod emittiert. Diese Emissionen dauerten für mindestens eine Woche an [Nucleonics Week 1999a]. Dann wurde das System abgeschaltet; die Fenster des betroffenen Gebäudes wurden abgedichtet.

Eine Bilanz des Ablaufes zeigt eindeutig, dass die Information der Behörden und die Einleitung der ersten Gegenmaßnahmen zu langsam erfolgten – und das in einem hoch entwickelten Industriestaat mit gut ausgebauter Infrastruktur.

Ebenso klar ist, dass die fortdauernde Jodemission viel zu spät erkannt und abgestellt wurde.

Von diesen Punkten abgesehen kann nachträglich nicht mehr beurteilt werden, ob die Schutzmaßnahmen optimal waren. Die genaue Strahlenbelastung in der Umgebung kann nicht mehr rekonstruiert werden – es sind lediglich Abschätzungen möglich, die insbesondere für die kurzlebigen Jod-Isotope wenig belastbar sind. Daher wird es auch nicht möglich sein, ein genaues Bild der radiologischen Spätfolgen zu erhalten.

Derartige Ungewissheiten werden mit hoher Wahrscheinlichkeit selbst bei besserer Organisation und schnellerer Reaktion bei nuklearen Unfällen niemals völlig vermieden werden können.

6.6 Fazit

Der Reaktor eines Kernkraftwerkes enthält große Mengen hochgiftiger radioaktiver Schadstoffe. Bei einem schweren Unfall kann ein nennenswerter Teil dieser gefährlichen Substanzen in die Atmosphäre verfrachtet werden. Dies gilt für alle Reaktortypen, die zurzeit kommerziell eingesetzt werden oder in konkreter Planung sind.

Gerade bei Unfällen mit besonders schweren Freisetzungen – wie etwa Terror-Angriffen oder kriegereischen Einwirkungen, bei denen ein Reaktorgebäude zerstört wird, oder intern ausgelösten Unfällen mit frühem Versagen des Containment – gelangt die radioaktive Wolke schon wenige Stunden nach Unfallbeginn in die Atmosphäre. Die Vorwarnzeit, die für Maßnahmen des Katastrophenschutzes zur Verfügung steht, ist sehr gering. Entsprechend der Windgeschwindigkeit kann die Wolke schon am ersten Tag hunderte Kilometer zurücklegen.

Die Strahlenbelastung der Bevölkerung nach einem solchen Unfall kann zu akuten Strahlenschäden führen. Auf jeden Fall können Millionen von Menschen von den Langzeitwirkungen betroffen sein. Ihnen drohen Krebs und andere Erkrankungen sowie Veränderungen des Erbgutes (Mutationen).

Um für den Ernstfall vorbereitet zu sein, ist eine Vielzahl der unterschiedlichsten Maßnahmen erforderlich. Wegen der grenzüberschreitenden Auswirkungen müssen dies auch Staaten leisten, auf deren Gebiet keine Kernkraftwerke und andere Atomanlagen betrieben werden.

Es muss in den verschiedensten Bereichen ein erheblicher Aufwand getrieben werden. Frühwarn- und Alarmsysteme müssen eingerichtet werden, für Bevorratung und Evakuierung sind Pläne zu erstellen, Vorkehrungen für Dekontamination und Behandlung von Strahlenopfern sind zu treffen und vieles andere mehr.

Dies stellt eine dauernde Belastung dar, solange Kernkraftwerke in Betrieb sind: Die Pläne und Vorkehrungen müssen laufend überprüft und aktualisiert, bei Ausbau der weltweiten Kernenergienutzung auch ausgebaut werden.

Selbst bei optimaler Planung für den Katastrophenschutz ist allerdings zu befürchten, dass die rechtzeitige Umsetzung vieler Maßnahmen gerade im Nahbereich, der am stärksten gefährdet ist, aufgrund der kurzen Vorwarnzeiten nicht möglich ist. Dabei kann dieser Nahbereich je nach Windgeschwindigkeit auch noch Landstriche in hundert Kilometer Entfernung umfassen.

Es ist mehr als fraglich, ob Maßnahmen wie die Ausgabe von Jodtabletten und insbesondere die Evakuierung der gefährdeten Bevölkerung rechtzeitig durchgeführt werden können. Die Räumung von Großstädten innerhalb einiger Stunden ist schlechthin unmöglich.

Schließlich ist zu bedenken, dass Evakuierungen, soweit sie durchgeführt werden können, zu weiteren schwerwiegenden Belastungen der betroffenen Menschen führen. Diesen droht für lange Zeiträume die Unterbringung in Notunterkünften. In den „Auffangräumen“ kann es zu psychischem Stress und sozialen Spannungen kommen. Arbeitsplätze sind verloren, Ausbildung und Schulbesuch in Frage gestellt. Ganze Städte werden als funktionierende soziale Einheiten ausgelöscht, Nachbarschaften und sogar Familien werden zerrissen.

In den letzten Jahren gibt es internationale Bemühungen, den Katastrophenschutz zu verbessern. Sie zielen sowohl auf die Entwicklung von Prognosemodellen und anderen Entscheidungshilfen für den Fall schwerer Freisetzungen, als auch auf die Zusammenstellung von allgemeingültigen, grundlegenden Anforderungen ab. Diese Anstrengungen gehen zweifellos in die richtige Richtung, können jedoch auch keine tragfähige Lösung liefern. Genauer betrachtet, zeigen sie letztlich nur die weitgehende Hilflosigkeit angesichts der nuklearen Katastrophe.

Drei Beispiele aus den letzten drei Jahrzehnten illustrieren die grundlegenden Probleme des Katastrophenschutzes, die auch heute noch bestehen und wohl niemals völlig gelöst werden können:

Beim Unfall in Three Mile Island 1979 waren die für Planung Zuständigen tagelang nahezu hilflos, weil aus der Anlage unvollständige und verwirrende Informationen geliefert wurden.

Die Katastrophe von Tschernobyl 1986 zeigte die drastischen Folgen, die eine Umsiedlung auf Dauer für die betroffenen Menschen haben kann. Außerdem machte sie deutlich, dass bei einem schweren Unfall ganze Kontinente betroffen sind und die Folgen noch nach Jahrzehnten in mehr als tausend Kilometer Abstand vom Unfallort Gegenmaßnahmen erforderlich machen.

Bei dem Kritikalitätsunfall in Tokai Mura 1999 schließlich war in erster Linie bemerkenswert, wie langsam die Verantwortlichen in Betriebsleitung und Behörden trotz frühzeitig vorliegenden Informationen reagierten – und das in einem modernen Industriestaat mit sehr guter Infrastruktur.

Wirksame Katastrophenschutzplanung muss also sowohl die Weiträumigkeit als auch den Langzeitcharakter der Unfallfolgen berücksichtigen. Außerdem muss sie mit der Möglichkeit unvollständiger Informationen bzw. zögerlichen Handelns der unmittelbar Verantwortlichen rechnen.

Neben technischen und medizinischen Aspekten muss sie soziale, psychologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte ins Kalkül ziehen – und das alles vor dem Hintergrund, dass eine große Zahl verschiedener Staaten betroffen und ein internationaler Informationsaustausch sowie die internationale Koordination der entsprechenden Aktivitäten erforderlich ist.

All das gilt für Länder, in denen keine Kernkraftwerke betrieben werden, ebenso wie für solche, die sich für den Einsatz der Atomkraft entschieden haben.

Es ist nicht zu sehen, wie alle diese Anforderungen erfüllt werden können. Es handelt sich um eine Herausforderung, die die Grenzen menschlicher Handlungsmöglichkeiten aufzeigt.

6.7 Literaturhinweise

BFS (2006): Pilze und Wildbret im süddeutschen Raum noch immer belastet; report on website of the Federal Office for Radiation Protection (Bundesamt für Strahlenschutz, BfS) dated May 18, 2006; www.bfs.de, consulted September 14, 2006

Deppe, U. et al. (1992): Transporte gefährlicher Güter auf dem Stadtgebiet von Hannover unter Berücksichtigung möglicher Gefahren und Auswirkungen durch radioaktive Stoffe; Landeshauptstadt Hannover, Amt für Umweltschutz, Schriftenreihe kommunaler Umweltschutz Nr. 1/1992

Energy News (2004): 16.05.2004

Feider, M. (2004): L'harmonisation de la sureté nucléaire en Europe: le point de vue d'un pays ne possédant pas de centrale nucléaire; CONTROLE, La Revue de l'Autorité de Sureté Nucléaire, Paris, No. 159, Juillet 2004, p. 69-72

Forschungszentrum Karlsruhe (2003): Präsentation zu RODOS, 21.05.2003; zur weiteren Entwicklung, siehe: www.rodos.fzk.de, eingesehen am 14.09.2006

Herviou, K. und Winter, D. (1999): Organisation and Operation of the IPSN crisis centre in case of accident in a French PWR; EUROSAFE, Paris, 18 & 19 November 1999

Hille, P. et al. (1996): Die Folgen des Reaktorunfalls von Tschernobyl für Mensch und Umwelt; Forum für Atomfragen, Wien, Dezember 1996

IAEA (1986a): Convention on Early Notification of a Nuclear Accident. 18.11.1986 INFCIRC/335 <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf335.shtml>

IAEA (1986b): Convention on Assistance in the Case of Nuclear Accident or Radiological Emergency. 8.11.1986 INFCIRC/336 <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf336.shtml>

IAEA (2002): International Atomic Energy Agency: Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency; IAEA Safety Standards Series, Requirements No. GS-R-2, jointly sponsored by FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, OCHA & WHO, Vienna, November 2002

Innenausschuss des Deutschen Bundestages (1979): Harrisburg-Bericht – Bewertung des Störfalles im Kernkraftwerk Harrisburg; 2. Zwischenbericht für den Innenausschuss des Deutschen Bundestages, der Bundesminister des Innern, Bonn, 01.06.1979

Länderausschuss für Atomkernenergie (1999): Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen; Beschlüsse des Länderausschusses für Atomkernenergie – Hauptausschuss – vom 06.04.1999 und der Innenministerkonferenz vom 11.06.1999

Mangano, J. (2004): Three Mile Island: Health Study Meltdown; Bulletin of the Atomic Scientists Vol. 60, No. 5, September/October 2004, p. 30-35

May, J. (1989): Das Greenpeace-Handbuch des Atomzeitalters; deutsche Ausgabe, Knauer, München 1989

Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein (1999): Gefahren der Atomkraft; 2. aktualisierte Auflage, Kiel, Mai 1999

de Oliveira, N. (2006): C. Nogueira de Oliveira: Renforcer les standards internationaux pour la préparation et la réponse en cas de situation d'urgence; CONTROLE, La Revue de l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN), No. 171, Juillet 2006

Nuclear Fuel (1999): Nuclear Fuel Vol. 24, No. 20, October 4, 1999

Nucleonics Week (2006): Nucleonics Week Vol. 47, No. 17, April 27, 2006

Nucleonics Week (1999): Nucleonics Week Vol. 40, No. 40, October 7, 1999

Nucleonics Week (1999a): Nucleonics Week, Vol. 40, No. 41, October 14, 1999

OECD NEA (2002): Chernobyl – Assessment of Radiological and Health Impact; NEA Committee on Radiation Protection and Public Health, OECD Nuclear Energy Agency, Paris 2002

Smith, J.T. et al. (2000): Pollution: Chernobyl's legacy in food and water; Nature 405, 141, 2000

Strahlenschutzkommission (2004): Verwendung von Jodtabletten zur Jodblockade der Schilddrüse bei einem kerntechnischen Unfall – Empfehlung der Strahlenschutzkommission; verabschiedet in der 192. Sitzung der Strahlenschutzkommission, 24./25. Juni 2004

Strahlentelex (2004): Nr. 410-411, 2004

UNOCHA (2000): United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA): Chernobyl – A Continuing Catastrophe; United Nations, New York and Geneva, April 2000

WISE (1999): WISE news communiqué, No. 520, October 29, 1999

Yablokov (2006): A. Yablokov (editor) et al.: The Chernobyl Catastrophe – Consequences on Human Health; Greenpeace, Amsterdam, April 2006

7 Möglichkeiten nuklearer Proliferation durch die Nutzung kommerzieller Kernkraftwerke

Steven Sholly

März 2006

Anmerkung des Herausgebers:

Von Anbeginn war die Entwicklung der Kernenergie stark mit militärischen Interessen verknüpft. Die Debatte um die nukleare Proliferation stand am Anfang der Diskussion um die kommerzielle Nutzung der Kernenergie und ist bis heute Teil der Diskussion geblieben. Die internationale Auseinandersetzung um das Nuklearprogramm des Iran ist nur ein aktuelles Beispiel.

Eine Bewertung der nuklearen Option wäre daher unvollständig ohne Betrachtung des möglichen Missbrauchs nuklearen Materials für nicht-friedliche Zwecke. Ein umfassendes Papier zu den Möglichkeiten der Staaten, die derzeit keine Kernwaffen besitzen, aus der kommerziellen Nutzung von Kernenergie waffentaugliches Material zu verbreiten (proliferieren), wurde für die Österreichische Bundesregierung erstellt. Es sind jedoch Informationen und Fragen in diesem Zusammenhang zu diskutieren, die nicht zur Publikation geeignet sind. Daher wurde für die vorliegende Druckausgabe eine gekürzte Fassung durch Streichung derartiger Textteile erzeugt. Auch in der gekürzten Fassung bleibt die Relevanz von Proliferationsfragen für die Bewertung der Nuklearen Option offenkundig.

Inhaltsverzeichnis

7	Möglichkeiten nuklearer Proliferation durch die Nutzung kommerzieller Kernkraftwerke	156
7.1	Einleitung	156
7.1.1	Zielsetzung	156
7.1.2	Hintergrund	156
7.1.3	Anmerkung betreffend URL (Uniform Resource Locator) Adressen in den Referenzen	160
7.1.4	Aufbau des Berichtes	160
7.2	Potentielle Proliferationsanfälligkeit des kommerziellen Kernbrennstoffzyklus	160
7.2.1	Direktanreicherung von Uranhexafluorid zu HEU	162
7.2.2	Die Aufbereitung von frischem LWR Brennstoff zu Uranhexafluorid und Anreicherung zu HEU	163
7.2.3	Wiederaufbereitung von abgebranntem Kernbrennstoff, um waffenfähiges Plutonium und/oder Neptunium-237 herzustellen	164
7.3	Wie schwierig ist es, eine Kernwaffe herzustellen?	164
7.3.1	Allgemeine Überlegungen	164
7.3.2	Das „Nth Country Experiment“	166
7.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	169
7.4	Kernwaffenfähige Länder	167
7.6	Literatur	172

7 Möglichkeiten nuklearer Proliferation durch die Nutzung kommerzieller Kernkraftwerke

7.1 Einleitung

7.1.1 Zielsetzung

Ziel dieses Berichtes ist es, mögliche Pfade für nukleare Proliferation aufzuzeigen, die im Rahmen des Brennstoffzyklus kommerzieller Kernkraftwerke (Kernspaltung) unter Berücksichtigung aller Vorgänge, vom Abbau in den Minen bis zur Endlagerung der Abfälle (inklusive Wiederaufarbeitung und Recycling), verfügbar sein könnten. In diesem Bericht wird der Begriff „Proliferation“ durch „Weiterverbreitung von Kernwaffen, kernwaffenfähigen Materials und Kernwaffen-Technologie“ definiert [DOE 1998].

Dieser Bericht behandelt nur am Rande Proliferationspfade, die sich aus anderen Gebieten der Nuklearwissenschaften (wie z.B. Forschungsreaktoren, Beschleunigeranlagen, Fusionskonzepten usw.) ergeben. Dieser Bericht beschäftigt sich ebenfalls nicht mit anderen Waffen als Kernwaffen (z.B. die Zerstreuung von radioaktiven Material, so genannte „schmutzige Bomben“) [Carafano and Spencer 2004]¹.

7.1.2 Hintergrund

Als Teil des Kyoto-Protokolls im Rahmen des UN-Abkommens zum Klimawandel „*Convention on Climate Change*“, im Dezember 1997 verabschiedet, wurde ein „*clean development mechanism*“ (CDM) definiert, um Entwicklungsländern bei der Entwicklung von Energieproduktionsanlagen, die keine Treibhausgase ausstoßen, zu unterstützen. Einige Organisationen haben vorgeschlagen, den CDM auf Kernkraftwerksprojekte auszudehnen, allerdings ist dieser Vorschlag bis heute nicht angenommen worden. Manche Aspekte oder Charakteristika der Kernenergie sind relevant für die Frage, ob sie in den CDM aufgenommen werden. Ziel dieses Berichtes ist es, einen dieser Aspekte zu behandeln, nämlich die Möglichkeit, kommerzielle Brennstoffzyklen zur Produktion von Kernwaffen zu nutzen.

Der Bericht behandelt speziell das aus dem Kernbrennstoffzyklus resultierende Proliferationspotenzial für Nationen, die noch nicht „Kernwaffenstaaten“² sind. Diese Fokussierung ergibt sich aus dem Ziel des Kyoto-Protokolls, das sich an Nationen (nicht an subnationale oder multinationale Gruppen) richtet. Die Begrenzung der Zielrichtung auf kommerzielle Brennstoffzyklen ergibt sich aus der dem Argumentarium zugrundeliegenden Frage, ob der kommerzielle Brennstoffzy-

¹ Leser, die an den radiologischen Aspekten von Waffen basierend auf der Zerstreuung von Nuklearmaterial interessiert sind, werden auf andere Berichte über die Zerstreuung von radioaktivem Material (radiological dispersion devices: RDDs) verwiesen, von denen einige leicht erhältlich sind. (Carafano & Spencer 2004; Ferguson, et al. 2003; Ford 1998).

² Die Bezeichnung „Kernwaffenstaaten“, die in diesem Bericht verwendet wird, hat nicht dieselbe Bedeutung wie im NPT („Nonproliferation Treaty“ Vertrag zur Nicht-Verbreitung von Kernwaffen). Im NPT werden nur fünf „Kernwaffenstaaten“ anerkannt: die Volksrepublik China (PRC), Frankreich, die Russische Föderation, Großbritannien und die USA. Die NPT-Definition berücksichtigt nicht, dass z.B. Indien und Pakistan sehr offensichtlich Kernwaffen besitzen (beide haben mehrfach Nukleartests durchgeführt).

klus nachhaltig ist. Daher betrachtet dieser Bericht keine anderen Aspekte als die Kernenergie, ebensowenig Fragen wie Sabotage, Terrorismus oder Militäraktionen, die von anderen Autoren behandelt werden.

Außerdem ist dieser Bericht auf die horizontale Proliferation fokussiert. Eine vertikale Proliferation ist möglich – das heißt „Kernwaffenstaaten“ können den kommerziellen Brennstoffzyklus dazu nutzen, zusätzliche Kernwaffen zu produzieren, die existierenden Kernwaffen zu verbessern oder die Schlagkraft der existierenden Kernwaffen zu erhalten. Diese Überlegungen sind nicht nur rein theoretischer Natur - die Vereinigten Staaten von Amerika nutzen das Kernkraftwerk Watts Bar (betrieben durch die Tennessee Valley Authority und genehmigt durch die US NRC) zur Erzeugung von Tritium für die Anwendung in ihrem Kernwaffenprogramm. Eine solche vertikale Proliferation wird in diesem Bericht nicht weiter behandelt, da der Fokus dieses Berichtes das Potenzial der Proliferation aus dem kommerziellen Kernbrennstoffzyklus für Nicht-Kernwaffenstaaten ist.

Der kommerzielle Brennstoffzyklus³ ist immer mit dem Risiko behaftet, dass bei Umgehung der international anerkannten Sicherheitsabkommen nukleare Sprengkörper oder Kernwaffen hergestellt werden können. Es kann nur diskutiert werden, wie einfach oder schwierig es ist, an verschiedenen Stellen des Brennstoffkreislaufes an geeignetes kernwaffenfähiges Material zu kommen, aber das Potenzial des Kernbrennstoffzyklus, zur Herstellung von Kernwaffen herangezogen zu werden, kann niemals völlig ausgeschlossen werden. Das Risiko zur Kernwaffen-Proliferation bei der Erzeugung von Strom oder Prozesswärme ist über den Brennstoffzyklus eines kommerziellen KKW möglich. Dieses Risiko kann nur minimiert, jedoch niemals „eliminiert“ werden.

Im oben definierten Rahmen dieses Berichtes ist die erste Aufgabe die Identifizierung derjenigen Nationen, die bereits Kernwaffen besitzen. Der wichtigste Versuch, das Risiko der Proliferation aus dem kommerziellen Brennstoffkreislauf heraus auf internationalem Niveau zu kontrollieren, ist der Vertrag zur Nicht-Verbreitung von Kernwaffen, der meist als „Nonproliferation Treaty“ oder einfach NPT bezeichnet wird [IAEO 1970]. Im März 1970 trat der von beinahe allen Nationen der Welt unterschriebene NPT-Vertrag in Kraft. Die folgenden vier Nationen gehören nicht (oder nicht mehr) zum NPT (Beachte: Alle diese vier Staaten wurden als „Kernwaffenstaaten“ identifiziert):

- Indien
- Israel
- Nord Korea (DPRK) (trat vom NPT am 10. Jänner 2003 zurück)
- Pakistan

³ Der Brennstoffzyklus umfasst die folgenden Schritte:

- Abbau und Aufbereitung von Uranerz und die Umwandlung zum „Yellow Cake“.
- Produktion von entweder Uran-Metall oder Uranhexafluorid (UF₆) als Vorstufe zur Anreicherung.
- Anreicherung des Uran-235 Anteils in natürlich vorkommendem Material (0,7 % U-235 zu 3 % - 5 %).
- Produktion von Brennstoff und der „Abbrand“ in einem KKW.
- Entfernen des abgebrannten Materials aus dem Reaktor und Abkühlen in einem Lager für abgebrannte Brennstoffe.
- Transport des abgebrannten Kernbrennstoffs zu einer Wiederaufbereitungsanlage (falls verwendet) zur Trennung des Plutoniums für die Wiederverwendung in Mischoxid (MOX)-Brennstoffen und Verglasen des restlichen hoch radioaktiven Abfalls.
- Vorbereitung des abgebrannten Brennstoffes und/oder verglasten Abfalls für die Lagerung.
- Lagerung des abgebrannten Brennstoffes und/oder verglasten Abfalls in einem geeigneten geologischen Endlager.

Daneben gibt es verschiedene multilaterale Vereinbarungen für den kontrollierten Austausch von so genannten Doppelanwendungs-Ausrüstungen („dual use equipment“, z.B. Geräte, die sowohl zivile als auch militärische Nutzung zulassen). Diese multilateralen „Doppelanwendungs“-Vereinbarungen sind die folgenden:

- The Nuclear Suppliers Group (NSG), <http://www.nsg-online.org/>.
- The Zangger Committee, <http://www.zanggercommittee.org/Zangger/default.htm>.

Es existieren auch einige bilaterale und multilaterale Abkommen und Verträge, durch die die Verbreitung von Nuklearwaffen kontrolliert werden soll. Diese Abkommen wurden umfangreich beschrieben und brauchen hier nicht weiter aufgezählt zu werden⁴.

Für diesen Bericht werden „Kernwaffenstaaten“ basierend auf den folgenden vier Kriterien identifiziert:

1. Von dem Staat ist bekannt, dass er Kernwaffen besitzt, weil er dies selbst zugibt und einen oder mehrere Nukleartests durchgeführt hat.
2. Der Staat hat öffentlich bekannt gegeben, dass er Kernwaffen besitzt und diese Angabe wird trotz fehlender Nukleartests weitestgehend als richtig angenommen.
3. Der Staat wird verdächtigt, Kernwaffen zu besitzen und dieser Verdacht wird weithin als richtig angenommen, trotz des Schweigens oder konträrer Aussagen der betreffenden Regierung.
4. Der Staat hatte Kernwaffen, diese wurden abgeschafft (diese Abschaffung wurde verifiziert).

Basierend auf diesen Kriterien gibt es zehn Kernwaffenstaaten:

- China (Kriterium 1; auch ein NPT-Kernwaffenstaat).
- Frankreich (Kriterium 1; auch ein NPT-Kernwaffenstaat).
- Indien (Kriterium 1).
- Israel⁵ (Kriterium 3).

⁴ Zum Beispiel:
Federation of American Scientists on „Arms Control Agreements”,
<http://www.fas.org/nuke/control/index.html>.
Arms Control Association’s Web page on „Treaties”,
<http://www.armscontrol.org/treaties/>.
Center for Nonproliferation Studies, Monterey Institute of International Studies,
<http://cns.miis.edu/pubs/inven/index.htm>.

⁵ Israel verweigert jede Stellungnahme zu Spekulationen, dass es eine große Anzahl an Kernwaffen besitzt. Nichtsdestoweniger wird Israel verdächtigt, 75-200 (oder mehr) Kernwaffen verschiedener Typen zu besitzen (Cirincione 2003; Farr 1999; Hersh 1993; Norris 2002; Sublette 2004; UIC 2004; WP1996).

- Nordkorea (DPRK)⁶ (Kriterium 2)⁷.
- Pakistan (Kriterium 1).
- Russische Föderation (Kriterium 1; auch ein NPT-Kernwaffenstaat).
- Südafrika⁸ (Kriterium 4).
- Vereinigtes Königreich oder Großbritannien und Nordirland (Kriterium 1; auch ein NPT-Kernwaffenstaat).
- Vereinigte Staaten von Amerika (Kriterium 1; auch ein NPT-Kernwaffenstaat).

Diese Liste enthält keine Nationen, die früher Teil der Sowjetunion waren und nach deren Unabhängigkeit die sowjetischen Kernwaffen an die Russische Föderation zurückgegeben haben (Weißrussland, Kasachstan, und die Ukraine). Länder, in denen Kernwaffen stationiert waren, die nicht dem fraglichen Land gehörten, sind ebenfalls nicht in dieser Liste enthalten (dies war eine relativ lange Liste von Staaten während des „kalten Krieges“ und noch immer gibt es eine Anzahl solcher Länder).

Der Rest dieses Berichts behandelt das Potenzial des kommerziellen Brennstoffkreislaufs zur Produktion von Kernwaffen in Ländern, die nicht zu den zehn oben identifizierten Kernwaffenstaaten gehören. Leser, die sich für Details der Kernwaffenprogramme dieser zehn Staaten interessieren, werden keine Schwierigkeiten haben, eine Fülle von öffentlich zugänglichen Dokumenten darüber zu finden.

Es sollte angemerkt werden, dass ungeachtet des Risikos der Proliferation aus dem kommerziellen Kernbrennstoffzyklus, die oben genannten zehn Kernwaffenstaaten zudem spezifische Anlagen und Programme (China, Frankreich, Pakistan, die Russische Föderation, Südafrika, das Vereinigte Königreich und die Vereinigten Staaten) oder Hochleistungsforschungsreaktoren (Indien, Israel, Nordkorea) zur Herstellung von kernwaffenfähigem Material besitzen. Es gibt dennoch einige Fälle, die die Grenze überschritten haben und die als Fälle der Proliferation aus dem Kernbrennstoffzyklus heraus angesehen werden können⁹.

⁶ Nordkorea behauptet, Kernwaffen zu besitzen. Obwohl dies nicht von unabhängiger Seite bestätigt wurde und Nordkorea keinen Nukleartest durchgeführt hat, gibt es keinen wesentlichen Grund anzunehmen, dass die Behauptung unrichtig ist. Der US Geheimdienst CIA hat festgestellt, dass Nordkorea eine kleine Anzahl an Kernwaffen besitzt (CRS 2003, CRS 2004).

⁷ Anmerkung des Herausgebers: Nordkorea hat am 09. Oktober 2006 einen unterirdischen Atomwaffentest durchgeführt.

⁸ Südafrika entwickelt sechs Gun-Typ Kernwaffen aus hoch angereichertem Uran (HEU), ebenso wie Teile für eine siebente Waffe, bevor diese wieder demontiert wurden und Südafrika nach dem Beitritt zum NPT-Abkommen als kernwaffenfreier Staat gilt (Albright 1994; Albright 2001; Horton 1999), NTI 2004a, Von Baeckmann 1995).

⁹ Die Vereinigten Staaten nutzen derzeit spezielle Anordnungen im Kern des Kernkraftwerks Watts Bar zur Erzeugung von Tritium für das Kernwaffenprogramm. Außerdem nutzen die USA den Plutoniumproduktionsreaktor Hanford Reservation (der „N-Reaktor“) zur Erzeugung von Elektrizität zur Einspeisung ins Netz. Das Vereinigte Königreich hat ebenfalls Plutoniumproduktionsreaktoren zur Erzeugung von Elektrizität für das Stromnetz genutzt. Weiters haben die Vereinigten Staaten und Indien jeweils mindestens einen Test mit „reaktorfähigem“ Plutonium durchgeführt.

7.1.3 Anmerkung betreffend URL (Uniform Resource Locator) Adressen in den Referenzen

Viele Referenzen dieses Berichtes (siehe Kapitel 6) beinhalten Uniform Resource Locator (URL)-Adressen, in denen während der Erstellung des vorliegenden Berichtes die entsprechenden Referenzen enthalten waren. Ohne Zweifel sind sich die meisten Leser der temporären Natur von URL-Adressen bewusst. Für alle Referenzen gilt, dass ein Zitat soweit wie möglich komplett angegeben wurde, um es dem Leser zu erleichtern, das fragliche Dokument zu finden. URL-Adressen werden jeweils angegeben, allerdings unter dem Vorbehalt, dass sich Web Adressen oft ändern.

7.1.4 Aufbau des Berichtes

Der nachfolgende Teil des Berichtes ist folgendermaßen aufgebaut:

- Kapitel 2 diskutiert in größerem Detail die Proliferations-Anfälligkeit der verschiedenen Stufen des nuklearen Brennstoffkreislaufs und hebt einige speziell Proliferations-anfällige Stellen hervor.
- Kapitel 3 vertieft sich in die Frage, wie schwierig (oder leicht) es ist, eine Kernwaffe zu entwerfen, zu entwickeln, zu bauen und zu verkaufen. Dies ist wichtig, um herauszufinden, wie weit eine mögliche Proliferation gehen und dabei unentdeckt bleiben kann.
- Kapitel 4 identifiziert Länder, welche als „kernwaffenfähig“ betrachtet werden können und begründet diese Behauptung.
- Kapitel 5 beinhaltet eine Zusammenfassung, die Schlussfolgerungen und Empfehlungen.
- Kapitel 6 beinhaltet die Literaturhinweise (zusammen mit, wo verfügbar, URL-Adressen für die Dokumente).

7.2 *Potentielle Proliferationsanfälligkeit des kommerziellen Kernbrennstoffzyklus*

Es existiert eine Vielzahl von Büchern über das Thema der Anfälligkeit für Proliferation im kommerziellen Kernbrennstoffkreislauf. Leser, die eine vollständige Behandlung dieses Themas suchen, sollten eines dieser Bücher zu Rate ziehen. Die Aufgabe hier ist es, einfach die prinzipiellen Schwachstellen des kommerziellen Kernbrennstoffzyklus für Proliferation zu identifizieren.

Um eine Kernwaffe herzustellen und einzusetzen, muss man (a) über einen funktionierenden Konstruktionsplan verfügen und die Möglichkeit zur Fertigung haben; (b) über das notwendige nukleare Material verfügen; und (c) über Mittel und Wege verfügen, die Waffe zum Ziel zu bringen. Das sich aus der Literatur ergebende Bild zeigt, dass (a) und (c) relativ einfach sind, während der schwierige Teil darin besteht, das notwendige nukleare Material zu beschaffen. Um

eine Kernwaffe herzustellen, braucht man hoch angereichertes Uran (HEU, entweder U-235 oder U-233), „waffenfähiges“ Plutonium oder Neptunium-237¹⁰.

Die Erstellung eines Kernwaffen-Konstruktionsplans kann relativ unabhängig von der Verfügbarkeit des nuklearen Materials gesehen werden, dennoch muss natürlich der Konstruktionsplan das spaltbare Material berücksichtigen, das zu beschaffen oder herzustellen geplant ist. Ein Kernwaffen-Konstruktionsplan ist zwar die Grundvoraussetzung einer Kernwaffenproduktion, aber dennoch unabhängig vom Kernbrennstoffzyklus. Er kann daher erstellt werden, unabhängig davon, ob ein bereits existierender Brennstoffzyklus zur Verfügung steht, der das notwendige nukleare Material liefert, das letztendlich für den Bau erforderlich ist.

Ähnlich verhält es sich mit dem Transport von Kernwaffen zum Einsatzort, der auch unabhängig vom Kernbrennstoffzyklus ist. Studien und Produktion der Mittel zum Kernwaffentransport können unabhängig vom Kernbrennstoffkreislauf durchgeführt werden (unter der Bedingung, dass die Transportmittel mit dem Design, Größe und dem Gewicht der Kernwaffe abgestimmt sein müssen).

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Schwachstellen im kommerziellen Brennstoffzyklus, die die Proliferation von kernwaffenfähigem Material für die Kernwaffenproduktion ermöglichen könnten. Mit Blick darauf, dass sich dieser Bericht nur auf den kommerziellen Brennstoffkreislauf bezieht (für die Erzeugung von Kernwaffenmaterial bestimmte Produktionsanlagen und Forschungsreaktoren werden in diesem Bericht nicht behandelt), beschäftigt sich die folgende Ausführung mit den prinzipiellen Schwachstellen bezüglich der Proliferation¹¹:

- Direktanreicherung von Uranhexafluorid (UF_6) zu HEU.
- Herstellung von frischem LWR-Brennstoff (schon zu 3 % und 5 % Uran-235 angereichert), Produktion von Uranhexafluorid, und Fertigstellung der Anreicherung zum HEU-Level.
- Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff, um waffenfähiges Plutonium oder Neptunium-237 zu erhalten.
- Entnahme von abgebranntem Kernbrennstoff aus einem Endlager mit hochaktivem Abfall und Wiederaufarbeitung, um waffenfähiges Plutonium und/oder Neptunium-237 herzustellen.

Im ersten Fall kann das eigentlich für den kommerziellen Kernbrennstoffzyklus vorgesehene Ausgangsmaterial UF_6 zu HEU angereichert werden, anstatt die Anreicherung beim Niveau LEU (niedrig angereichertes Uran), das als Reaktor-brennstoff dient, zu stoppen. Die anderen drei Punkte behandeln die Möglichkeit des Umleitens oder des Diebstahls von Kernbrennstoff aus dem Brennstoffkreislauf.

¹⁰ Es gibt eine Menge Diskussion und Missverständnis über die Waffenfähigkeit von Neptunium-237. Neptunium-237 ist ein spaltbares Material, und wird im US DOE genannt (z.B. DOE Order 5480.3, Safety Requirements for the Packaging and Transportation of Hazardous Substances and Hazardous Wastes, 9 July 1985; http://packages.lln.gov.doe_ord/o5480.pdf und IAEA standards). Neptunium-237 wird auch in anderen Literaturstellen als spaltbares Material bezeichnet (Rothstein 1999; Albright 1999); das Experiment in Los Alamos National Laboratory im September 2002, das die kritische Masse von Neptunium-237 bestimmte, hat diesen Punkt definitiv geklärt (LANL 2002a).

¹¹ Der Proliferations-Missbrauch eines Leichtwasserreaktors für die Plutoniumproduktion ist in *Diversions and Misuse Scenarios for Light-Water Reactors*, Kapitel 5 (May 2001) gut beschrieben. Diese Arbeit nimmt allerdings an, dass die Plutonium-Route die größte Schwachstelle ist. Unter Beachtung der folgenden Diskussion wird ersichtlich, dass dies keineswegs der Fall ist.

Der erste und der dritte Fall sind relativ einfach. Die Direktanreicherung von UF_6 zu HEU erfordert nur mehr Zeit und Energie als die Anreicherung bei dem Niveau zu stoppen, das für die Herstellung von KKW-Brennstoffen (drei bis fünf Prozent Uran-235) notwendig ist. Die Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff, um waffenfähiges Plutonium oder/und Neptunium-237 herzustellen, ist ebenfalls eine direkte Möglichkeit. Die Rückholung von abgebranntem Kernbrennstoff aus einem Endlager und die Wiederaufarbeitung zu waffenfähigem Plutonium und/oder Neptunium-237 ist nur eine Variante des Falls, den abgebrannten Kernbrennstoff aus einem Zwischenlager zu entnehmen. Einige weitere Bemerkungen für alle vier Fälle werden die relativen Schwierigkeiten aufzeigen.

7.2.1 Direktanreicherung von Uranhexafluorid zu HEU

Als die Urananreicherung mittels Gasdiffusionsanlagen und elektromagnetischer Isotopentrennung (EMIS) durchgeführt wurde, war die Konstruktion dieser Anlagen und deren Betrieb (durch den Stromverbrauch) so teuer, dass nur einige wenige Länder sich diese Urananreicherungsanlagen leisten konnten und diese Länder hatten bereits Kernwaffen. (Dies hielt den Irak allerdings nicht davon ab, Urananreicherung mit Hilfe der EMIS-Technologie anzustreben [Albright & Hibbs 1991; Gsponer & Hurni 1995; Gsponer 2001])¹².

Mit dem Aufkommen anderer Methoden zur Anreicherung, war dieses Hindernis nicht mehr weiter relevant und andere Länder mit weniger Ressourcen und Infrastruktur können nun Urananreicherung betreiben. Im Speziellen hat sich die Gaszentrifugentechnologie¹³ weltweit ausgebreitet.¹⁴ Andere Urananreicherungstechnologien sind die atomare und molekulare Laser-Isotopentrennung und die aerodynamische Trennung im Wirbelrohr (dies wurde erfolgreich im Südafrikanischen Kernwaffenprogramm eingesetzt; allerdings benötigen diese Verfahren ebenfalls eine große Menge Elektrizität).

Inzwischen sind nicht mehr Milliarden Dollar Investitionen und hunderttausende Megawatt Strom nötig, um Urananreicherung für ein kleines Kernwaffenprogramm zu betreiben. Die Änderung von Ziel und Grad der Urananreicherung und die Änderungen bei der HEU-Herstellung, sowie die veränderten Möglichkeiten, HEU für Kernwaffenprogramme bereitzustellen, zusammen mit der Tatsache, dass es nicht allzu schwer ist, Kernwaffen herzustellen, werden von Oelrich gut beschrieben:

„Ein Proliferator hat zwei Routen, die ihn zu einer Bombe bringen, eine ist das Plutonium und die andere das Uran. Plutonium kommt in der Natur nicht vor und muss in einem Kernreaktor erzeugt werden, sobald es entstanden ist, kann es einfach abgetrennt werden. Allerdings sind Bomben aus Plutonium weit schwieriger zu konstruieren und zu fertigen. Auf der anderen Seite ist die einfachste Uran Bombe, eine sogenannte Gun-Typ-Waffe, in der ein Teil des Urans in den ande-

¹² Diese Erfahrungen zeigen, dass man keine hochtechnologischen Mittel braucht, um zu Kernwaffen-Proliferation zu kommen, solange eine gewisse Technologie existiert. Die Mittel der Verbreitung müssen nicht effizient und state-of-the-art sein, um zu funktionieren. Es genügt, wenn sie auf einem Niveau funktionieren, das für den potentiellen Proliferator ausreicht.

¹³ Bei Gaszentrifugen wird UF_6 in eine evakuierte Kammer mit einem reibungsfreien Hochgeschwindigkeits-Rotor eingebracht. Das schwerere U-238-haltige Gas wird mehr an dem Rand konzentriert, während das leichtere U-235 mehr in der Mitte gesammelt ist. Weitere Information darüber z.B. im Institute for Science and International Security, „What is a Gas Centrifuge“, 2003; <http://www.exportcontrols.org/centrifuges.html>; and Federation of American Scientists (Oelrich 2004).

¹⁴ Einschließlich Deutschland, Iran, Irak, Japan, Libyen, Niederlande, Nord Korea, Pakistan, die Russische Föderation, das Vereinigte Königreich, und bald in den USA. (Boureston 2004; CIA 2003; CIA 2004; FAS 2000; Green 2003; MTCL 1998).

ren geschossen wird, wirklich recht einfach. Aber das erforderliche waffenfähige Uran ist sehr schwierig herzustellen, denn es erfordert Gasdiffusionsanlagen mit hohem Energieverbrauch. Daher würde jede der präsentierten Routen für einen Möchte-gern-Proliferator zumindest eine große technische Hürde enthalten, entweder die Bombe oder das Material. Weiters erfordert die Produktion von waffenfähigem Material geeignete Anlagen, die nur schwer zu verbergen sind.

Moderne Gaszentrifugen ändern dieses Bild. Diese machen die Trennung von spaltbarem Uran-235 wesentlich einfacher und billiger als mit Gasdiffusionsanlagen, potentiell sogar einfacher als die Produktion von Plutonium, so dass die einfachste Möglichkeit, an bombenfähiges Material zu kommen, mit der einfachsten Gun-Typ-Bauart kombiniert wurde. Moderne Zentrifugen eröffnen nun die nukleare Option für eine neue Gruppe von Proliferatoren mit nur moderatem technischem Stand, wie z.B. den Irak, Iran oder Nord Korea. Zudem sind Zentrifugenanreicherungsanlagen modulare Anlagen und viel kleiner als Gasdiffusionsanlagen. Sie benötigen vermutlich nur 5 %¹⁵ der elektrischen Energie einer Gasdiffusionsanlagen. Damit wird nicht nur die Entwicklung der Kernwaffen einfacher, sondern auch das Überwachen der Urananreicherung zur friedlichen Nutzung in Kernkraftwerken und das Auffinden von geheimen Bomben- Programmen schwieriger.“ [Oelrich 2004]

7.2.2 Die Aufbereitung von frischem LWR Brennstoff zu Uranhexafluorid und Anreicherung zu HEU

Obwohl es offensichtlich den Eingeweihten innerhalb der Industrie klar ist, ist es nicht allgemein bekannt, dass nach der Anreicherung des Uran zu dem für LWR gebräuchlichen Uran-235 Gehalt (der Anteil an Uran-235 ist zwischen 3 % und 5 %) bereits mehr als 80 % der Anreicherungsarbeit zur Herstellung von waffenfähig angereichertem Uran (HEU) schon erbracht worden ist [Sokolski 2003]. Basierend auf diesen Schätzungen des Non-Proliferation Education Centers [NPEC 2003; Sokolski 2003] könnte ein Land mit Kernbrennstoff der ersten Kernbeladung eines 1000 MWe LWR beginnen und diesen als Ausgangsmaterial für die weitere Anreicherung nutzen.

Unter der Annahme eines 20 kg HEU-Kerns für eine Implosionswaffe könnten 50 Kernwaffen mit einer Rate von einer pro Woche mit 11.000 Zentrifugen oder einer Rate von einer alle zwei Tage mit etwa 44.000 Zentrifugen produziert werden. Unter der Annahme von Prozessresten mit 2 % Uran-235-Gehalt würden zusätzlich 1700 kg Uran-235 in diesen Resten enthalten sein, von dem eine große Menge durch kontinuierliche Anreicherung und Abscheidung von Resten mit geringerer Konzentration zurück gewonnen werden könnte.

Diese Rechnung gibt einige Hinweise, wie weitere Anreicherung von LEU-Reaktorbrennstoff für die Herstellung von Kernwaffen genutzt werden könnte. Wenn der Prozess bei einem höheren Anreicherungsgrad gestartet wird (z.B. 5 % angereichertes LEU für einen längeren Brennstoffzyklus), wird die Produktionsrate für Kernwaffen etwas schneller. Selbstverständlich wird bei Einsatz einer kleineren Anzahl an Zentrifugen die Kernwaffen-Produktionsrate entsprechend variieren.

¹⁵ Die Federation of American Scientists vermutet, dass es sogar nur etwa 2,5 % sind - der Strombedarf für eine Arbeitseinheit („separate work unit“ (SWU)) für Urananreicherung mittels Gasdiffusionsanlagen wird auf ca. 2400 kWh geschätzt, während dies für Gaszentrifugenanlagen rund 60 kWh sind (FAS 2000; MCTL 1998).

7.2.3 Wiederaufbereitung von abgebranntem Kernbrennstoff, um waffenfähiges Plutonium und/oder Neptunium-237 herzustellen

Die Wiederaufbereitung von abgebranntem Kernbrennstoff, um Plutonium oder/und Neptunium-237 zu erhalten, ist in der Literatur betreffend eine speziell für diese Zwecke konstruierte Aufarbeitungsanlage gut beschrieben. Die Extraktionstechnologien sind öffentlich zugänglich (der PUREX-Prozess für Plutonium und eine Variante davon für Neptunium-237).

Allerdings, wie schwierig würde es für eine subnationale Gruppe sein, dies zuwege zu bringen? Die Antwort wird in einer speziellen Proliferations-Schwachstellen-Untersuchung des US-Departments of Energy mit Experten von vier nationalen Labors (Sandia, Lawrence Livermore, Los Alamos, and Savannah River) geliefert. Im Folgenden sind die einschlägigen Fakten und Meinungen dieser Gruppe kurz zusammengefasst [Hinton et al. 1996]:

- Die Befürchtung, dass unautorisierte Personen oder Gruppen unerlaubterweise plutoniumhaltiges Material durch gewaltsamen Diebstahl oder heimliches Umleiten an sich bringen und daraus ausreichend Plutonium-Metall für den Bau einer Kernwaffe gewinnen, wird mit „ziemlich wahrscheinlich“ bezeichnet.
- Die Technologie, um Plutonium aus abgebrannten Brennstäben zu extrahieren, ist in der veröffentlichten Literatur zugänglich.
- Die erforderliche Technologie zur Plutonium-Extraktion stellt einen „relativ einfachen Prozess“ dar, der von einer feindlichen Gruppe in einer Behelfs- oder vorübergehend genutzten Anlage, wie einem Lagerhaus oder einer kleinen Industrieanlage, durchgeführt werden kann.
- Die benötigten Ausgangsmengen, um eine signifikante Menge Plutonium aus abgebrannten Brennstäben herzustellen, sind relativ gering.
- Eine kleine gut vorbereitete Gruppe könnte möglicherweise in vier bis acht Wochen genügend Plutonium aus abgebrannten Brennstäben extrahieren, um eine Kernwaffe damit zu bauen.
- Vier Personen mit den geeigneten Qualifikationen würden dafür ausreichen.

7.3 Wie schwierig ist es, eine Kernwaffe herzustellen?

7.3.1 Allgemeine Überlegungen

Während des zweiten Weltkrieges wurde in den Vereinigten Staaten das „Manhattan-Projekt“ für Kernwaffen und die damit zusammenhängenden Plutonium-Produktions- und Uran-Anreicherungsstechnologien in einem Zeitraum von drei Jahren mit einem Aufwand von 2 Milliarden \$ (1945 Dollar) und der Arbeit von Tausenden an Wissenschaftlern und Ingenieuren entwickelt. Etwa vierzig Jahre später stellte Südafrika sechs Kernwaffen mit Kosten von etwa 1 Milliarde \$ (1980 Dollar) und der Arbeit von 400 Personen und einheimischer Technologie her. Daraus zeigt sich ganz klar, dass es nicht nötig ist, das „Manhattan-Projekt“ zu wiederholen, um Kernwaffen herzustellen [O'Shei 1976; Stumpf 1995].

Die folgenden Feststellungen von Experten auf diesem Gebiet sollen als Illustration zur Schwierigkeit der Kernwaffenherstellung dienen:

- *„Die relevante Technologie ist zunehmend verfügbar. Im nuklearen Bereich ist viel Information über Produktion, Herstellung und Verhalten bei hohen Temperaturen und Drucken von Materialien, wie Uran, Plutonium und Beryllium in der veröffentlichten Literatur enthalten. Ständige Fortschritte in Gebieten wie der Computertechnik, der Sprengstoffe und der Präzisionswerkstoffmaschinen erleichtern die Aufgabe der Neuerfindung von Kernwaffen. Wenn es nicht wesentlich ist, Größe und Gewicht der Waffe zu minimieren und ihre Wirkung vorherzusagen, sollte die bei heutigen PCs verfügbare Rechenleistung für die Entwicklung von Waffen aller technischen Niveaus ausreichend sein, inklusive der thermonuklearen Waffen, und zwar bei nur minimalen Nukleartests. Relativ wenig ausgereifte Kernwaffen könnten unter solchen Bedingungen ohne jeden Nukleartest angesammelt werden, insbesondere wenn eine Anzahl nicht-nuklearer Testmethoden verfügbar ist.“ [Cohen 1991]*
- *„Sobald adäquate Mengen an angereicherterem Uran oder an Plutonium verfügbar sind, sollte das Problem der Herstellung einer einfachen Kernwaffe für jeden Staat der Welt, der auch nur einen bescheidenen Grad an Kompetenz auf dem Gebiet der Nukleartechnik entwickelt hat, nicht allzu groß sein. Die Konstruktionsgrundlagen der ersten Generation von Kernwaffen sind heutzutage weithin bekannt. Eine kleine Anzahl von Wissenschaftlern und Ingenieuren, die Erfahrung auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung von Kernenergie haben, könnten jederzeit einen funktionierenden Konstruktionsplan entwerfen. Die tatsächliche Fertigung einer Waffe würde nur ein kleines Team an halbwegs qualifizierten Experten unterschiedlicher Fachgebiete mit Zugang zu Labors und Produktionsanlagen und leicht zu beschaffender Ausrüstung erfordern.“ [Goldberger et al. 1985]*
- *„Sobald waffenfähiges Material vorhanden ist, ist der nächste Punkt Konstruktion und Herstellung der Waffe. Verglichen mit dem Problem, das waffenfähige Material herzustellen, ist dies der vergleichsweise einfache Teil. Die fundamentale Technologie, eine Waffe zu bauen, steht jedem Land zur Verfügung, das über eine Rüstungsindustrie verfügt (dies ist im Wesentlichen jedes Land mit einer signifikanten Armee). Die Technologien zur tatsächlichen Herstellung einer Kernwaffe, wie die im Zweiten Weltkrieg von den USA eingesetzte, sind gemessen am heutigen Stand relativ einfach und weithin verfügbar. ... Theoretisch hat jede industrialisierte Nation der Welt die technische Möglichkeit, eine Kernwaffe binnen weniger Jahre nach der Entscheidung zu deren Entwicklung herzustellen. Nationen mit vorhandener substanzieller Kerntechnik und Rüstungstechnik könnten eine Kernwaffe binnen ein bis zwei Jahren fertig gestellt haben. Die großen Industrienationen (wie z.B. Japan und Deutschland) könnten, nachdem sie die Entscheidung dazu getroffen haben, in einigen Jahren ein ähnliches Arsenal an Kernwaffen aufbauen, wie Russland und die USA vor der Jahrtausendwende nach dem Inkrafttreten des START II Abkommens geplant hatten. Es ist ebenso sehr wahrscheinlich, dass die meisten Länder mit fortgeschrittenen militärischen Systemen in gewissem Ausmaß Entwicklungsarbeiten für Nuklearwaffen unternommen haben. Dies ist beinahe zwingend aus Gründen der nationalen Sicherheit, wenn auch nur, um einheimische Expertise zur Auswertung geheimdienstlicher Erkenntnisse und zur Beurteilung der Möglichkeiten etwaiger Feinde zu haben.“ [Sublette 2001]*
- *„... Für einen potentiellen Proliferator stehen einige sehr einfache Kernwaffenkonstruktionsentwürfe zur Verfügung. Auf diesen Konstruktionsentwürfen basierende Waffen würden wenig*

Ähnlichkeiten mit den hochentwickelten Waffen der heutigen Atommächte haben, aber dies ist eher nebensächlich, denn auch einfache Waffen könnten eine Explosion verursachen, die mit hunderten oder tausenden Tonnen TNT vergleichbar ist. Dies ist eine wesentlich einfachere Aufgabe, als die meisten Leute denken. Das Hauptproblem ist es, eine adäquate Menge von spaltbarem Material sicher zu stellen.“ [Cote 1996]

- *„Ein signifikanter Punkt ist, dass eine einfache Konstruktionsplanung für eine Kernspaltungswaffe keine Tests erfordern würde, um zu belegen, dass sie funktioniert. Eine Debatte könnte nur die Sprengkraft betreffen.“ [Hinton et al. 1996]*
- *„Obwohl waffenfähiges Plutonium für die Entwicklung und Herstellung von Kernwaffen zu bevorzugen ist, kann auch reaktorfähiges Plutonium verwendet werden. Die Technologie zur Gewinnung des Pu aus abgebrannten Brennelementen ist in der veröffentlichten Literatur verfügbar und kann leicht für verschiedene Materialformen adaptiert werden. Die für eine signifikante Menge an Plutonium erforderlichen Ausgangsmengen werden als relativ gering eingeschätzt. Das Vorhandensein einer Strahlungsabschirmung und das Erfordernis einer chemischen Aufbereitung während der Pu-Gewinnung stellen große Anforderungen bei verschiedenen Materialformen dar. Dennoch kann eine kleine, gut ausgebildete Gruppe wahrscheinlich innerhalb von zwei Monaten eine ausreichende Menge an Plutonium gewinnen. Das Plutonium unerreichbar zu halten, ist der Schlüssel, um Proliferation zu vermeiden.“ [Hinton et al. 1996]*
- *„Kernwaffentests sind für Staaten, die sich Kernwaffen beschaffen wollen, nicht essentiell erforderlich, wie dies früher der Fall war, da die Information über Kernwaffen heute weit verbreitet ist. Die technischen Hürden, denen sich die US Kernwaffenkonstrukteure in den 1940er Jahren gegenüber sahen, sind längst vorbei. An den Universitäten werden Kurse über Physik, Maschinenbau, Metallurgie und Chemie angeboten, die eine ausreichende Grundlage für ein Nuklearwaffenprogramm liefern. Der Informations-Superhighway erlaubt Forschern in entfernten Orten, an tausende von relevanten Artikeln und Berichten heranzukommen und Unterstützung von Experten zu erhalten, die vor der Erfindung des Internets unzugänglich waren. Fortgeschrittene Computer, auch wenn nicht unbedingt erforderlich, sind heute leicht erhältlich und erleichtern die Waffenkonstruktion. Der Wissensstand hat sich auch bezüglich der Materialien weiterentwickelt, so dass es für eine Nation heute leichter ist, weniger große Waffen zu bauen, als dies zu Beginn des US Kernwaffenprogramms der Fall war. Zusammengenommen erlauben diese Variablen einem Land, eine Kernwaffe mit hoher Zuverlässigkeit zu bauen, die vor nicht allzu langer Zeit noch als relativ ausgeklügelt angesehen worden wäre.“ [Bailey 1998]*

Es könnte sein, dass das Wissen über die nicht mehr vorhandenen Schwierigkeiten bei der Herstellung von Kernspaltungswaffen vermutlich ein Faktor war, der Militärschläge gegen die Nuklearanlagen im Irak in mindestens drei Fällen auslöste (durch Israel und die Vereinigten Staaten) und mindestens sieben Irakische Luftangriffe auf die Reaktorbaustelle im Iran [Vandenbroucke 1984].

7.3.2 Das „Nth Country Experiment“

Mitte der 60er Jahre wurde unter der Leitung des Lawrence Radiation Laboratory (später Lawrence Livermore National Laboratory) das so genannte „Nth Country Experiment“ durchgeführt. Dieses Experiment sollte feststellen, ob ein nicht-nukleares Land die Möglichkeit hätte, eine funktionierende Kernwaffe zu entwerfen nur unter Zuhilfenahme der in der Öffentlichkeit damals verfügbaren Quellen (also Mitte der 1960er Jahre).

Das drei-Personen-Team, alle mit einem Bachelor's Abschluss, wählten eine sphärische Plutonium-Implosionskonstruktion, da dies schwieriger war. Eines der drei Mitglieder des Teams verließ das Team und wurde durch einen Armee-Leutnant mit einem PhD Abschluss ersetzt [Stober 2003]¹⁶.

Insgesamt wurden drei Personenjahre für die Konstruktion aufgewendet [Frank 1967]. Der Konstruktionsplan wurde als zu groß für eine Rakete befunden, allerdings klein genug, um mit Hilfe eines Flugzeuges oder LKWs transportiert zu werden. Der Konstruktionsplan wurde nie mit einer Kernexplosion getestet, wurde aber mit Hilfe eines damals verwendeten Kernwaffen-Computerprogramms durchgerechnet, mit dem Ergebnis, dass es ein brauchbarer Konstruktionsplan war [Stober 2003].

Entsprechend einem veröffentlichten Bericht war das Nth-Country-Experiment erfolgreich, da ein brauchbarer Konstruktionsplan produziert wurde.¹⁷ Wie derselbe Autor feststellte:

„In den Jahren seither ist wesentlich mehr Information in die Öffentlichkeit gekommen, so dass der notwendige Aufwand offensichtlich weiter gesunken ist. Dieses Experiment legte eine obere Grenze des erforderlichen Aufwandes fest, der so gering ist, dass die Hoffnung, dass das Fehlen von Information auch nur einen kleinen Schutz gegen Proliferation bietet, vergebens ist.“ [Sublette 2001]

7.4 Kernwaffenfähige Länder

Dieser Abschnitt des Berichtes identifiziert „kernwaffenfähige Länder“. Es werden auch Länder identifiziert, die über „Breakout-Fähigkeiten“ verfügen - die Fähigkeit, eine große Anzahl von Kernwaffen sehr schnell herzustellen, wenn die Entscheidung getroffen wurde. Für die Ziele dieses Berichts wird ein Land als kernwaffenfähig betrachtet, wenn es das erforderliche technische Wissen und die industrielle Kapazität zur Herstellung von Kernwaffen besitzt, ebenso wie den Zugriff auf waffenfähiges Nuklearmaterial. Es sollte im Auge behalten werden, dass, nachdem nahezu alle Staaten (außer vier Ausnahmen, die alle Kernwaffenstaaten sind) dem NPT angehören, der Übergang vom kernwaffenfähigen Staat zum tatsächlichen Kernwaffenstaat entweder den Bruch des Abkommens (was einige Male passiert ist) erfordert, oder die Option des Austritts aus dem NPT mit einer 90-tägigen Ankündigung, was Nordkorea kürzlich getan hat (als erstes Land bisher).

Die Bezeichnung eines Landes als kernwaffenfähig in diesem Bericht bedeutet nicht, dass dieses Land die Absicht besäße, Kernwaffen herzustellen. Die Zielrichtung ist hier, die Fähigkeit von Nicht-Kernwaffenstaaten zur Herstellung von Kernwaffen aus dem Kernbrennstoffzyklus heraus zu bewerten, nicht deren Absicht, dies auch tatsächlich zu tun. Folgerungen über derartige Absichten aus dem Bericht abzuleiten, ist weder beabsichtigt, noch kann dies vernünftigerweise erwartet werden. Nichtsdestotrotz haben einige der Staaten, die in diesem Bericht als kernwaffenfähig bezeichnet werden, politische oder militärische Experten oder Organisationen gehabt, die in der Vergangenheit ein Interesse oder einen Wunsch ihres Landes zur Herstellung von Kern-

¹⁶ Die Gruppe dieser drei bestand zunächst aus David Dobson, David Pipkorn (der das Team nach einigen Monaten verließ) und Robert Selden (Stober 2003). Selden wurde später ein Mitglied des Nuclear Emergency Search Teams (NEST), das im Lawrence Livermore National Laboratory und später im Los Alamos National Laboratory arbeitete.

¹⁷ Ein Artikel im US News & World Report schätzte die Sprengkraft auf ca. 15 Kilotonnen voraus (Pethokoukis 2003).

waffen geäußert haben. In einigen Fällen hatten diese Staaten sogar Kernwaffenprogramme, die anschließend beendet wurden¹⁸.

Es sollte bei der Durchsicht der kernwaffenfähigen Staaten festgehalten werden, dass einfach der Betrieb eines Kernkraftwerks in den meisten Fällen für ein Land schon den Status „kernwaffenfähig“ impliziert. Abgebrannter Kernbrennstoff aus Leichtwasserreaktoren (DWR, SWR, RBMK und WWER) und Schwerwasserreaktoren (PHWR) kann mit ad hoc-Verfahren wiederaufbereitet werden, um Plutonium zu gewinnen, das für Kernwaffen verwendet werden kann [Hinton 1996]. Faktoren, die die Kernwaffenfähigkeit weiter beeinflussen, sind unter anderen:

- Die Existenz nationaler Kernforschungsinstitute.
- Die Existenz einer nuklearen Infrastruktur (z.B. mit Nukleartechnologie befasste Zulieferfirmen, Techniker von Nuklearanlagen, beratende Kerntechnik-Industrie, Nukleare Service-Organisationen, usw.), speziell Verkäufer von Reaktoren.
- Die Existenz von Anlagen in Zusammenhang mit dem Kernbrennstoffzyklus, insbesondere Uran-Anreicherungsanlagen.
- Eine Wiederaufbereitungsanlage, oder zumindest frühere oder laufende Erfahrung oder Forschungsprogramme zur Brennstoffwiederaufbereitung, oder der Separation und Transmutation. Die Existenz von Heißen Zellen könnte Wiederaufbereitungsaktivitäten auf einer ad hoc-Basis erleichtern.
- Universitätsinstitute oder nationale wissenschaftliche Akademien für Kernphysik und/oder Kerntechnik.
- Die Existenz einer Rüstungsindustrie, insbesondere im Bereich von Sprengstoffen.
- Frühere oder aktuelle Erfahrung als Kernwaffen-Gastland, entweder für die Lagerung von Kernwaffen oder als Basis für Kernwaffen eines anderen Staates.

Eine zusammenfassende Liste der „kernwaffenfähigen“ Staaten ist unten in Tabelle 4.1. Man beachte, dass diese Liste auf dem Potenzial zur Proliferation ausschließlich aus dem kommerziellen Kernbrennstoffzyklus basiert. Es gibt andere Staaten, die zur Proliferation aus großen Forschungsreaktoren¹⁹ fähig sind, wie Indien, Israel und Nordkorea gezeigt haben. Diese Liste wurde aus einer großen Anzahl von Literaturhinweisen²⁰ erstellt, sowie aufgrund der Interpretationen dieser Referenzen durch den Autor des vorliegenden Berichtes. Es wurden

¹⁸ Von den in der Tabelle 7-1 aufgelisteten Staaten wird von den folgenden angenommen, dass sie Kernwaffenprogramme hatten oder ein Interesse an der Beschaffung von Kernwaffen geäußert haben: Argentinien, Brasilien, Deutschland, Iran, Italien, Rumänien, Schweden, Schweiz, Taiwan. Außerdem war nach dem Zusammenbruch der Sowjetunion die Ukraine für einen Zeitraum von einigen Jahren de facto ein Kernwaffenstaat, bevor die Kernwaffen an die Russische Föderation zurückgegeben wurden.

¹⁹ Derzeit wird Algerien als mögliche Proliferationsroute gesehen (Cordesmann 2003; WP 2004; SIPRI 2004).

²⁰ Neben anderen Literaturhinweisen handelt es sich um die folgenden: CEIP 2004; DOD 2001; NTI 2004b, Sublette 2001. Zusätzlich wurde in Fällen von schwer erhältlichen Quellen die nationalen Berichte der Länder für die „Convention on Nuclear Safety“ und die „Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“ als primäre Informationsquellen herangezogen.

sechszwanzig „kernwaffenfähige“ Staaten identifiziert, von denen vierzehn zumindest eine „Breakout-Fähigkeit“ besitzen.

Tab. 7-1 **KERNWAFFENFÄHIGE STAATEN**

Argentinien	Finnland	Litauen	Spanien
Armenien	Deutschland	Mexiko	Schweden
Belgien	Ungarn	Niederlande	Schweiz
Brasilien	Iran	Rumänien	Taiwan
Bulgarien	Italien	Slowakei	Ukraine
Canada	Japan	Slowenien	
Tschechien	Kasachstan	Süd Korea	

Einige dieser Staaten haben „Breakout-Fähigkeit“, d.h. die Fähigkeit eine große Zahl von Kernwaffen (einige Dutzend oder mehr) in sehr kurzer Zeit zu erzeugen. Die Staaten, denen dies zugetraut wird sind in der Tabelle durch Fettdruck hervorgehoben. Weder die Bezeichnung „kernwaffenfähig“, noch die Bewertung als „breakout-fähig“ unterstellen irgend eine Art von Absicht – sie beziehen sich lediglich auf das Potential.

lobensministerium.at

7.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieses Berichtes ist es, einen Überblick über die potentiellen Kernwaffen-Proliferationspfade aufzuzeigen, die aus dem Brennstoffzyklus eines kommerziellen Kernkraftwerks heraus möglich sind, unter Berücksichtigung aller Stufen vom Uranabbau bis zum Endlager radioaktiver Abfälle (inklusive Wiederaufbereitung und Recycling). Im Rahmen dieses Berichtes wird Proliferation als „die Verbreitung von Kernwaffen, Kernwaffenmaterial und Kernwaffentechnologie“ definiert.

Dieser Bericht behandelt nicht, abgesehen von Anmerkungen, die Proliferation, die aus anderen Aspekten der Nuklearwissenschaften (wie Forschungsreaktoren, Beschleunigern, etc.) resultiert. Proliferationspfade, die sich „möglicherweise aus Fusionsenergiekonzepten ergeben, werden ebenfalls nicht behandelt. Schließlich werden auch radiologische Streubomben (so genannte „schmutzige Bomben“) nicht behandelt.

Der kommerzielle Kernbrennstoffzyklus ist inhärent mit dem Risiko verknüpft, dass nukleare Sprengkörper oder Kernwaffen produziert werden können, wenn die internationalen Sicherheitsabkommen nicht befolgt werden. Es kann darüber diskutiert werden, wie leicht oder schwierig es ist, Proliferation aus den verschiedenen Stufen des nuklearen Brennstoffzyklus heraus zu betreiben, aber die Möglichkeit, den nuklearen Brennstoffzyklus zur Herstellung von Kernwaffen zu nutzen, kann nicht vermieden werden. Das Risiko der Kernwaffen-Proliferation ist unter den Verfahren zur Erzeugung von Elektrizität und Prozesswärme einzig beim kommerziellen nuklearen (Kernspaltung) Brennstoffzyklus möglich. Dieses Risiko kann minimiert, aber nicht vollständig eliminiert werden.

Es gibt nach der für diesen Bericht gewählten Definition zehn Kernwaffenstaaten: China, Frankreich, Indien, Israel, Nordkorea (DPRK), Pakistan, die Russische Föderation, Südafrika (das seine Waffen demontiert und dem NPT-Abkommen beigetreten ist), das Vereinigte Königreich und die

Vereinigten Staaten. Die Frage ist hier, ob es eine Möglichkeit gibt, den kommerziellen nuklearen (Kernspaltungs-) Brennstoffzyklus zu nutzen, um Kernwaffen in anderen Ländern, abgesehen von den zehn oben identifizierten Kernwaffenstaaten, herzustellen.

Die Antwort auf diese Frage ist: ja. Begrenzt man die Überlegungen nur auf den nuklearen Brennstoffzyklus, werden in diesem Bericht sechsundzwanzig andere Staaten identifiziert, die als „kernwaffenfähig“ bezeichnet werden, das heißt, die ausreichend technische und industrielle Kapazitäten, sowie eine Quelle für waffenfähiges Nuklearmaterial (abgebrannte Brennelemente oder separiertes „ziviles“ Plutonium, oder Anreicherungsanlagen zur Erzeugung von angereichertem Uran) haben, so dass sie Kernwaffen produzieren könnten (wenn sie die Entscheidung dazu trafen). Vierzehn von diesen 26 Staaten (also nahezu die Hälfte) wird eine so genannte „Breakout“-Fähigkeit zugeschrieben – die Fähigkeit, eine große Anzahl von Kernwaffen sehr schnell herstellen zu können, wenn die Entscheidung dazu getroffen würde.

Kernwaffen, insbesondere die erste Generation nuklearer Waffen, wie sie von den USA im Zweiten Weltkrieg eingesetzt wurden (und seit damals in einigen Ländern hergestellt wurden), sind nicht so schwierig herzustellen, wie üblicherweise angenommen wird. Es ist dagegen so, dass in Non-Proliferation-Kreisen weithin vermutet wird, dass das einzige Hindernis für einen Staat, Kernwaffen zu haben, die Notwendigkeit ist, an waffenfähiges Material heran zu kommen.

Es ist richtig, dass die zehn existierenden Kernwaffenstaaten diesen Status nicht aus einem kommerziellen Kernenergieprogramm heraus erzielt haben. Sie haben vielmehr entsprechende Produktionsanlagen für waffenfähiges Material oder (in zwei Fällen) Forschungsreaktoren für diesen Zweck genutzt. Wie in diesem Bericht dargestellt wird, liefert der kommerzielle Kernbrennstoffzyklus jedoch zwei prinzipielle Möglichkeiten zur Proliferation – über Anreicherungsanlagen (über hoch angereichertes Uran) und aus abgebrannten Brennelementen von Kernreaktoren (über reaktorfähiges aber für Waffen verwendbares Plutonium). Außerdem ist Neptunium-237 (das auch bei der Wiederaufarbeitung gewonnen werden kann) für Waffen verwendbar.

Wie in diesem Bericht dargelegt wird, kann die Abzweigung von frischem, niedrig angereichertem (etwa 3,5 %) Reaktorbrennstoff zu weiterer Anreicherung einen sehr schnellen Weg zu HEU darstellen, da ausgehend von natürlichem Uran bei einem Anreicherungsgrad von 3,5 % bereits über 80 % der notwendigen Arbeitsleistung für die Anreicherung auf 90 % erbracht worden ist. Es ist offensichtlich, dass bei höheren Anreicherungsgraden, wie sie für Reaktoren mit längeren Brennstoffzyklen (18-24 Monate anstelle von 12-15 Monaten) typisch sind, der Anreicherungsaufwand bereits zu mehr als 80 % erledigt ist.

Bei Waffen, die aus reaktorfähigem Plutonium hergestellt wurden, wird angenommen, dass sie im Vergleich zu Waffen aus waffenfähigem Plutonium zu früh detonieren, wenn sie nicht durch Tritium-Boosten oder andere Modifikationen in der Konstruktion adaptiert wurden. Dies bedeutet eine Verringerung der Sprengkraft – es sind sogar Verpuffungen (so genannte „Fizzle“-Explosionen) möglich. Dennoch, Fizzle-Explosionen sind nicht trivial und sicher keine „Blindgänger“. Die minimale Fizzle-Explosion, die für eine Implosionswaffe aus reaktorfähigem Plutonium erwartet wird, liegt in der Größenordnung von einer Kilotonne. Eine Ein-Kilotonne-Sprengkraft ist noch immer 4000 mal größer als die Explosion einer typischen 500-Pfund Militärbombe, sie würde bei Detonation in einer großen Stadt verheerende Konsequenzen haben.

Es ist klar, dass ein Proliferationspotenzial mit dem kommerziellen Kernbrennstoffzyklus gegeben ist, das mit der gegenwärtigen Technologie und derjenigen in naher Zukunft nicht vermeidbar ist. Selbst in den besten denkbaren Fällen zukünftiger Technologie wird von „Proliferations-Widerstand“ gesprochen, nicht von „Proliferations-Sicherheit“.

7.6 Literatur

Albright (1991): D. Albright & M. Hibbs, *Iraq's Nuclear Hide-and-Seek*, Bulletin of the Atomic Scientists 47, September 1991

[http://www.thebulletin.org/print.php?art_ofn=sep91albright]

Albright (1994): D. Albright, *South Africa's Secret Nuclear Weapons*, Institute for Science and International Security (ISIS) (Washington, DC), May 1994

[<http://www.isis-online.org/publications/southafrica/ir0594.html>]

Albright (1999): D. Albright & K. O'Neill (eds.), *Challenges of Fissile Material Control*, Institute for Science and International Security Press (Washington, DC), March 1999

[<http://www.isis-online.org/publications/fmct/book/index.html>]

Albright (2001): D. Albright & C. Hinderstein, *South Africa's Nuclear Weaponization Efforts: Success on a Small Scale*, Institute for Science and International Security (ISIS) (Washington, DC), 13 September 2001

[<http://www.isis-online.org/publications/terrorism/safrica.pdf>]

ASNO (2004): Australian Safeguards and Non-Proliferation Office, *Annual Report 2003-2004*, Commonwealth of Australia (Canberra), 2004

[http://www.asno.dfat.gov.au/annual_report_0304/ASNO_2004_AR.pdf]

Bailey (1998): K. Bailey, *Statement by Dr. Kathleen C. Bailey*, Lawrence Livermore National Laboratory (Livermore CA USA), Testimony before the US Senate Committee on Governmental Affairs, Subcommittee on International Security, Proliferation, and Federal Services, 18 March 1998

[http://www.fas.org/spp/starwars/congress/1998_h/31898testbanbailey.html]

Barletta (1999): M. Barletta & C. Ellington, *South Africa's Nuclear Weapons Program: An Annotated Chronology, 1969-1994*, Center for Nonproliferation Studies, Monterey Institute of International Studies (Monterey, CA), March 1999

[<http://cns.miis.edu/research/safrica/chron.htm>].

Bergeron (2002): K. Bergeron, *Tritium On Ice: The Dangerous New Alliance of Nuclear Weapons and Nuclear Power*, MIT Press (Cambridge, MA USA), October 2002

Bergeron (2004): K. Bergeron, *Nuclear Weapons: The Death of No-Dual-Use*, Bulletin of the Atomic Scientists 60, January-February 2004

[http://www.thebulletin.org/article.php?art_ofn=jf04bergeron]

Boureston (2004): J. Boureston, *Tracking the Technology*, Nuclear Engineering International 49, 31 August 2004

[<http://www.neimagazine.com/story.asp?sectioncode=76&storyCode=2024442>]

Carafano (2004): J. Carafano & J. Spencer, *Dealing With Dirty Bombs: Plain Facts, Practical Solutions*, Backgrounder No. 1723, The Heritage Foundation (Washington, DC), 27 January 2004

[<http://www.heritage.org/Research/HomelandDefense/loader.cfm?url=/commonspot/security/getfile.cfm&PageID=55037>]

CEIP (2004): Carnegie Endowment for International Peace, Nuclear Status, Web Site, as of 26 November 2004

[<http://www.ceip.org/files/nonprolif/map/default.asp>]

CIA (2003): US Central Intelligence Agency (CIA), Unclassified Report to Congress on the Acquisition of Technology Relating to Weapons of Mass Destruction and Advanced Conventional Munitions, 1 January 2003 Through 30 June 2003 (Washington, DC), November 2003

[http://www.cia.gov/cia/reports/721_reports/pdfs/jan_jun2003.pdf]

CIA (2004): US Central Intelligence Agency (CIA), Unclassified Report to Congress on the Acquisition of Technology Relating to Weapons of Mass Destruction and Advanced Conventional Munitions, 1 July 2003 Through 31 December 2003 (Washington, DC), November 2004

[http://www.cia.gov/cia/reports/721_reports/pdfs/721report_july_dec2003.pdf]

Cirincione (2003): J. Cirincione, Mr. Bush and Israel's Nuclear Weapons, *The Globalist* (Washington, DC), 27 May 2003

[<http://www.theglobalist.com/DBWeb/StoryId.aspx?StoryId=3217>]

[<http://www.iraqwatch.org/perspectives/bas-iraq-rules-nuke-8-91.htm>]

Cohen (1991): A. Cohen & M. Miller, *Iraq and the Rules of the Nuclear Game*, *Bulletin of the Atomic Scientists* 47, July/August 1991

Cordesman (2003): A. Cordesman, Weapons of Mass Destruction in the Middle East: Regional Trends, National Forces, Warfighting Capabilities, Delivery Options, and Weapons Effects, Center for Strategic and International Studies (Washington, DC USA), 15 April 2003

[http://www.csis.org/burke/mb/me_wmd_mideast.pdf]

Coté (1996): O. Coté, Jr., *A Primer on Fissile Materials and Nuclear Weapon Design*, Appendix B in G.T. Allison, et al., *Avoiding Nuclear Anarchy: Containing the Threat of Loose Russian Nuclear Weapons and Fissile Material*, CSIA Studies in International Security, John F. Kennedy School of Government, Harvard University (Cambridge, MA USA), 1996

[<http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/nukes/readings/appendixb.html>]

DOD (1998): US Department of Defense, Militarily Critical Technologies List, Section V, "*Nuclear Weapons Technology*" (Washington, DC), 1998

DOD (2001): US Department of Defense, *Proliferation: Threat and Response*, (Washington, DC), January 2001

[<http://www.defenselink.mil/pubs/ptr20010110.pdf>]

DOE (1998): US Department of Energy (DOE), *Glossary*, (Washington, DC), 2 December 1998

Farr (1999): Lt. Col. W. Farr (US Army), *The Third Temple's Holy of Holies: Israel's Nuclear Weapons*, Counterproliferation Papers, Future Warfare Series No. 2, US Air Force Counterproliferation Center, Air War College, Maxwell Air Force Base (Alabama), September 1999

[<http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cpc-pubs/farr.htm>]

FAS (2000): Federation of American Scientists, Uranium Production, part of the Special Weapons Primer, Nuclear Weapons web site (Washington, DC) 24 June 2000
[<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/uranium.htm>]

Ferguson (2003): C. Ferguson, T. Kazi & J. Perera, Commercial Radioactive Sources: Surveying the Security Risks, Occasional Paper No. 11, Center for Nonproliferation Studies, Monterey Institute of International Studies (Monterey, CA USA), January 2003
[<http://www.cns.miis.edu/pubs/opapers/op11/op11.pdf>]

Ford (1998): James L. Ford, Radiological Dispersal Devices: Assessing the Transnational Threat, National Defense University, Strategic Forum, Fort McNair (Washington, DC), Number 136, March 1998
[<http://www.ndu.edu/inss/strforum/SF136/forum136.html>]

Frank (1967): W. Frank (ed.), Summary Report of the Nth Country Experiment, UCRL-50249, Lawrence Radiation Laboratory (Livermore, CA USA), March 1967; original document is Secret/Restricted Data (i.e., Classified); this version was declassified in 1995 in response to a Freedom of Information Act request from George Washington University's National Security Archive

Garwin (1996): R. Garwin & V. Simonenko, Nuclear Weapon Development Without Nuclear Testing?, Pugwash Workshop on Problems in Achieving a Nuclear-Weapon-Free World (London), 25-27 October 1996
[http://www.fas.org/rlg/dev_no_test.htm]

Goldberger (1985): M. Goldberger, et al., Nuclear Arms Control: Background and Issues, Committee on International Security and Arms Control, National Academy of Sciences (National Academy Press: Washington, DC USA), 1985
[<http://books.nap.edu/catalog/11.html>]

Green (2003): R. Green, Back to the Future, Nuclear Engineering International, September 2003
[http://www.usec.com/v2001_02/Content/AboutUSEC/NEIAmericanCentrifugeArticle-09-03.pdf]

Gsponer (1995): A. Gsponer & J-P. Hurni, Iraq's Calutrons: Electromagnetic Isotope Separation, Beam Technology, and Nuclear Weapon Proliferation, ISRI-95-03, Independent Scientific Research Institute (Geneva), 19 October 1995
[<http://nuclearweaponarchive.org/Iraq/andre/ISRI-95-03.pdf>]

Gsponer (2001): A. Gsponer, Iraq's Calutrons: 1991-2001, Independent Scientific Research Institute (Geneva), 31 July 2001
[<http://nuclearweaponarchive.org/Iraq/Calutron.html>]

Hersh (1993): S. Hersh, The Samson Option: Israel's Nuclear Arsenal and American Foreign Policy, Vintage Books (New York), 1993

Hinton (1996): J. Hinton, R. Barnard, D. Bennett, R. Crocker, M. Davis, E. Groh, E. Hakkila, G. Harms, W. Hawkins, E. Hill, L. Kruse, J. Milloy, W. Swansiger & K. Ystesund, Proliferation Vulnerability Red Team Report, SAND97-8203, Sandia National Laboratories (Albuquerque, NM USA), October 1996
[http://infoserve.sandia.gov/sand_doc/1997/978203.pdf]

Horton (1999): Lt. Col. R. Horton, Out of (South) Africa: Pretoria's Nuclear Weapons Experience, Occasional Paper #27, US Air Force Institute for National Security Studies (Colorado Springs), August 1999

[<http://www.usafa.af.mil/inss/OCP/ocp27.pdf>]

[<http://www.fas.org/nuke/guide/rsa/nuke/ocp27.htm>]

IAEA (1970): International Atomic Energy Agency, Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, INFCIRC/140 (Vienna), 22 April 1970

[<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/infcirc140.pdf>]

LANL (2002): Los Alamos National Laboratory, Neptunium criticality achieved, Press Release 02-118 (Los Alamos, NM USA), 17 October 2002

[<http://www.lanl.gov/worldview/news/releases/archive/02-118.shtml>; images at

<http://www.lanl.gov/orgs/pa/News/neptunium.html>]

Mark (1990): J.C. Mark, *Reactor-Grade Plutonium's Explosive Properties*, Nuclear Control Institute (Washington, DC), August 1990

[<http://www.nci.org/NEW/NT/rgpu-mark-90.pdf>]

Mark (1996): C. Mark, T. Taylor, E. Eyster, W. Maraman & J. Wechsler, *Can Terrorists Build Nuclear Weapons?*, Nuclear Control Institute (Washington, DC), in P. Levanthal & Y. Alexander (eds.), *Preventing Nuclear Terrorism* (Lexington Books, Lexington, MA USA), 1996

[<http://www.nci.org/k-m/makeab.htm>]

May (2001): M. May (ed.), C. Braun, G. Bunn, Z. Davis, J. Hassburger, R. Lehman, W. Ruhter, W. Sailor, R. Schock & N. Suski, *Verifying the Agreed Framework*, UCRL-ID-142036, CGSR-2001-001, Center for Global Security Research, Lawrence Livermore National Laboratory, (Livermore, CA USA) and Center for International Security and Cooperation, Stanford University (Stanford, CA USA), April 2001

[<http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/240048.pdf>]

[<http://iis-db.stanford.edu/pubs/12020/VAF-June.pdf>]

Niksch (2003): L. Niksch, North Korea's Nuclear Weapons Program, IB91141, Congressional Research Service (Washington, DC USA), updated 27 August 2003

Norris (2002): R. Norris, W. Arkin, H. Kristensen & J. Handler, NRDC Nuclear Notebook: Israeli Nuclear Forces, 2002, *Bulletin of the Atomic Scientists* 58, September-October 2002

[http://69.36.186.201/print_nn.php?art_ofn=so02norris]

NPEC (2003): Non-Proliferation Education Center, *Breaking Out Without Quite Breaking the Rules* (Washington, DC), 15 May 2003

[<http://www.npec-web.org/pages/iranswu.htm>]

NTI (2004a): Nuclear Threat Initiative (NTI), South Africa Profile - Nuclear, (Washington, DC), Updated April 2004

[http://www.nti.org/e_research/profiles/SAfrica/Nuclear/]²¹

²¹ Die zitierte URL-Adresse ist die „Startseite“ für das Nukleare Profil Südafrikas. Interessierte Leser können den angebotenen Links zu zusätzlichen Abschnitten des Landesprofils folgen (Anlagen, Chronologie, Import/Export).

NTI (2004b): Nuclear Threat Initiative (NTI), Proliferation and Use of Nuclear Weapons (Washington, DC), Updated September 2004
[http://www.nti.org/f_wmd411/f1a4_1.html]

Oelrich (2004): I. Oelrich, All Spun Up: A Tutorial on Gas Centrifuges' Role in Proliferation, Federation of American Scientists (Washington, DC), 8 November 2004
[<http://www.fas.org/main/content.jsp?formAction=297&contentId=319>]

O'Shei (1976): Col. D. O'Shei (U.S. Army), Implications of Nuclear Proliferation, US Department of State, Senior Seminar in Foreign Policy, 18th Session 1975-1976. [Note: This document was recently declassified and released under the Freedom of Information Act in the United States
[<http://www.nautilus.org/foia/prolif.pdf>]

Pethokoukis (2003): J. Pethokoukis, Building the Bomb, US News & World Report, 2 September 2003
[<http://www.usnews.com/usnews/tech/nextnews/archive/next030902.htm>]

Rothstein (1999): L. Rothstein, *Explosive Secrets*, Bulletin of the Atomic Scientists 55, March/April 1999
[http://www.thebulletin.org/article.php?art_ofn=ma99rothstein]

Sessoms (1996): A. Sessoms, M. Kratzer, L. Lederman, A. MacLachlan, M. Miller, W. Panofsky, J. Taylor, F. von Hippel, Letter Report of the Task Force on the Nonproliferation and Arms Control Implications of Fissile Materials Disposition Alternatives, Secretary of Energy Advisory Board (SEAB), US Department of Energy (Washington, DC), 26 September 1996
[<http://www.seab.energy.gov/sub/fissmat.html>]

Shea (2004): D. Shea, Radiological Dispersal Devices: Select Issues on Consequence Management, Report No. RS21766, Congressional Research Service (CRS), Library of Congress (Washington, DC), 10 March 2004
[http://www.mipt.org/pdf/CRS_RS21766.pdf]

SIPRI (2004): Stockholm Peace Research Institute (SIPRI), Countries of Nuclear Strategic Concern, Web Site (Stockholm), as of 26 November 2004
[<http://projects.sipri.se/nuclear/cnscindex.htm>]

Sokolski (2003): H. Sokolski, Testimony before the United States House of Representatives, Committee on International Relations, pages 4-18 in House of Representatives, U.S. Nonproliferation Policy After Iraq, Serial Nr. 08-38 (Washington, DC), 4 June 2003
[http://www.house.gov/international_relations/108/87494.pdf]

Stober (2003): D. Stober, *No Experience Necessary: The Nth Country Experiment Showed That Three Post-Docs With No Nuclear Knowledge Could Design a Working Atomic Bomb*, Bulletin of the Atomic Scientists 59, March/April 2003.
[http://www.thebulletin.org/article.php?art_ofn=ma03stober]

Stumpf (1995): W. Stumpf, *Birth and Death of the South African Nuclear Weapons Programme*, Atomic Energy Corporation of South Africa, Ltd. (Pretoria), presented at the conference 50 Years After Hiroshima (Castiglione, Italy), 28 September to 2 October 1995.

[<http://www.fas.org/nuke/guide/rsa/nuke/stumpf.htm>]

Sublette (2001): C. Sublette, Nuclear Weapons Frequently Asked Questions, 9 August 2001.

[<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nwfaq.zip>]

Taylor (1996): T. Taylor, Nuclear Power and Nuclear Weapons, Nuclear Age Peace Foundation (Santa Barbara, CA USA), July 1996.

[http://www.wagingpeace.org/articles/1996/07/00_taylor_nuclear-power.htm]

UIC (2002): Uranium Information Center (UIC), Plutonium, Nuclear Issues Briefing Paper #18 (Melbourne), June 2002.

[<http://www.uic.com.au/nip18.htm>]

UIC (2004): Uranium Information Center (UIC), Iraq, North Korea & Iran - Implications for Safeguards (also South Africa, Israel and Libya), Nuclear Issues Briefing Paper #15 (Melbourne), January 2004.

[<http://www.uic.com.au/nip15.htm>]

Vandenbroucke (1984): L.S. Vandenbroucke, *The Israeli Strike Against Osiraq: The Dynamics of Fear and Proliferation in the Middle East*, Air University Review, Air University, U.S. Air Force, September-October 1984.

[<http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/aureview/1984/sep-oct/vanden.html>]

Von Baeckmann (1995): A. Von Baeckmann, G. Dillon & D. Perricos, Nuclear Verification in South Africa, IAEA Bulletin 37, January 1995, pages 42-48.

[http://www.iaea.or.at/search97cgi/s97_cgi?action=View&VdkVgwKey=http%3A%2F%2Fwww%2Eiaea%2Eorg%2FPublications%2FMagazines%2FBulletin%2FBull371%2Fbaeckmann%2Ehtml&QueryZip=nuclear+verification+in+south+africa&&viewTemplate=laea%2Fiaeacvw_smpl.hts&collection=iaeaSite]

WP (1996): The Wisconsin Project on Nuclear Arms Control, Israel's Nuclear Weapon Capability: An Overview, The Risk Report 2, July-August 1996.

[<http://www.wisconsinproject.org/countries/israel/nuke.html>]

8 Zeitgerechtheit* der Kernenergie Option

Geert Weimann und Helga Kromp-Kolb

Juli 2006, überarbeitet September 2006

Inhaltsverzeichnis

8	Zeitgerechtheit* der Kernenergie Option	180
8.1	Einleitung	180
8.2	Anforderungen	181
8.2.1	Ausmaß	181
8.2.2	Zeitraumen	183
8.2.3	Optionen	183
8.3	Lebensdauererstreckung	185
8.4	Neue Kernkraftwerke	186
8.5	Rahmenbedingungen	187
8.5.1	Bisherige Leistungsentwicklung	187
8.5.2	Sachkenntnis und Arbeitskräfte	188
8.5.3	Wirtschaftliche und strukturelle Rahmenbedingungen	189
8.5.4	Die Entwicklung des Marktes	190
8.5.5	Öffentliche Akzeptanz	190
8.5.6	Politische Rahmenbedingungen	192
8.5.7	Finanzmärkte und Investitionen	193
8.6	Das Nuklearabfallproblem	195
8.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	196
8.8	Literatur	199

* Entspricht dem englischen Wort „timeliness“ und drückt die rechtzeitige Verfügbarkeit der Kernenergie, z.B. zur Erfüllung der Kyoto-Verpflichtungen oder zur Schließung der befürchteten Energielücke aus.

8 Zeitgerechtheit* der Kernenergie Option

8.1 Einleitung

Die Kerntechnik Option wird häufig als wertvolle Beitragsmöglichkeit zum Erreichen der Kyoto-Ziele vorgeschlagen: als treibhausgasärmere Technologie soll sie die auf fossilen Brennstoffen beruhenden Technologien ersetzen. Soll ein nennenswerter Beitrag erzielt werden, würde dies eine beträchtliche Zunahme der installierten Kernenergieleistung implizieren.

Minderungen der Treibhausgasemissionen, die als Beitrag zur Erfüllung der Vereinbarungen des Kyoto Protokolls gedacht sind, müssten spätestens im Zeitraum 2008 bis 2012 wirksam werden. Die Frage ist, ob nukleare Lösungen rechtzeitig verfügbar sein werden, und zwar nicht als einzelne Pilotanlagen, sondern in Gigawatt-Dimensionen, die geeignet sind wesentlich zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beizutragen.

Aber nicht nur der Klimaschutz lässt die Nuklearindustrie auf eine Neubelebung hoffen. Auch zur Bedeckung des durch das Wirtschaftswachstum bedingten Mehrbedarfs an elektrischer Energie und zur Schließung der durch die bevorstehende Verknappung fossiler Brennstoffe (Öl, Gas) zu erwartenden Energielücke sagen verschiedene Energieszenarien ein signifikantes Wachstum der Kernenergie vorher. Auch hier stellt sich die Frage, ob derartige Zuwächse in den veranschlagten Zeiträumen erzielbar sind.

Eine signifikante Ausweitung der installierten Leistung ist nur möglich, wenn wesentliche Nachteile, die der Kernenergie vorgehalten werden – vor allem das außerordentliche Risiko und das Abfallagerungsproblem – überwunden werden. Denn natürlich ist zu fordern, dass der Ersatz von fossilen Brennstoffen umweltfreundlicheren, nachhaltigen Technologien vorbehalten bleibt. Anders als von der Kernenergieindustrie manchmal behauptet, muss die Kernenergie-Option die Erfüllung dieser Anforderung erst nachweisen.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Frage der Zeitgerechtheit, d.h. auf die Frage, ob ein Ausbau der Kernenergie so rasch erfolgen kann, dass er noch zeitgerecht erfolgt, um einen Beitrag zur Lösung der beschriebenen anstehenden Herausforderungen zu leisten. Wiewohl dies das Thema anderer Beiträge des vorliegenden Argumentariums ist, kommt man bei der Behandlung der Zeitgerechtheit nicht gänzlich um eine Diskussion von nuklearer Sicherheit, Brennstoffverfügbarkeit und Abfallproblematik herum, da diese Aspekte die Vorlaufzeitzeit neuer Kernkraftwerke bis zur kommerziellen Nutzung wesentlich bestimmen.

Zur Klärung der Zeitgerechtheit müssten, ausgehend vom Abbau spaltbaren Materials in Bergwerken bis zur Endlagerung von radioaktivem Abfall alle Bereiche und das gesamte System von technischen Anlagen, Einrichtungen und Betriebsstrukturen durchleuchtet werden. Zweifellos müsste die gesamte Produktionskette ihre Anstrengungen vervielfachen, um ein zeitgerechtes Wachstum bei gleichzeitigen tiefgreifenden technologischen Verbesserungen zu ermöglichen. Dabei stellt sich eine Vielzahl von Fragen:

* Entspricht dem englischen Wort „timeliness“ und drückt die rechtzeitige Verfügbarkeit der Kernenergie, z.B. zur Erfüllung der Kyoto-Verpflichtungen oder zur Schließung der befürchteten Energielücke aus.

- Welchen Anteil am Energiebedarf sollte und könnte die Kernenergie im Zeitraum bis etwa 2020 beanspruchen und vermutlich liefern? Wie gestalten sich während dieses Zeitraumes die dazu erforderlichen Randbedingungen? Welche Entwicklung müsste die Kernenergieindustrie nehmen?
- Sind die optimistischen Annahmen, die eine Renaissance und markante Ausweitung der vorhandenen Kapazitäten in nächster Zukunft in Aussicht stellen, aufgrund der Wachstumsfähigkeit der dazu erforderlichen Industriesparten und der Vielzahl von auszubildenden Fachkräften gerechtfertigt oder überzogen?
- Sind die genannten Zuwächse in dem in Betracht kommenden Zeitrahmen als realistisch anzusehen, oder werden Verzögerungen bei der Realisierung, wie bei der Markteinführung und Erprobung neuerer Kernreaktorkonzepte die Planungsunsicherheiten dominieren und den Erwartungen eher nicht entsprechen?
- Sind die Finanzmärkte für die erforderlich werdenden exorbitanten Investitionen vorhanden und hinreichend mit verfügbaren Finanzierungsvolumina ausgestattet? Ist die Höhe der Anfangsinvestitionen nach wie vor eine wirksame Hemmschwelle?

Eine tiefgreifende Beantwortung all dieser Fragen ist hier nicht möglich, aber es sollen einige wesentliche, zeitkritische Aspekte sowie Aspekte der Größenordnungen behandelt werden. Wenn sich bei diesen Bedenken hinsichtlich der Zeitgerechtigkeit der nuklearen Option ergeben, ist die Zeitgerechtigkeit insgesamt in Frage gestellt.

Abschließend sei noch festgehalten, dass viele angeführten Zahlendaten mit großen Unsicherheiten behaftet sind; die Gründe dafür liegen in Diskrepanzen zwischen den unterschiedlichen Quellen, die herangezogen wurden, und in der immanenten Unsicherheit, die Vorhersagen mit längerem Zeithorizont anhaftet.

8.2 Anforderungen

8.2.1 Ausmaß

Drei Grundfaktoren werden zur Klärung der Frage nach dem potentiellen Bedarf an Kernenergie betrachtet:

- die erforderlichen Emissionsreduktionen aus Gründen des Klimaschutzes,
- der Zuwachs des Bedarfes an Elektrizität und
- die zu erwartende Energielücke infolge der Verknappung von Öl und Gas.

Der Bedarf an Ersatzinvestitionen für Kernkraftwerke, die innerhalb des betrachteten Zeitraumes das Ende ihrer Lebenszeit erreichen und stillgelegt werden, ist ein zusätzlich zu berücksichtigender Faktor.

Die aus Gründen des Klimaschutzes erforderlichen Treibhausgasemissionsreduktion werden nicht an den im Kyoto Protokoll für die erste Beurteilungsperiode (2008 - 2012) vereinbarten Re-

duktionen von 5 % gemessen, da ein wesentlicher Beitrag der Kernenergie in dem verbleibenden Zeitraum von maximal 6 Jahren nicht mehr möglich ist. Vielmehr muss es um die im Post-Kyoto Prozess zu erwartenden Reduktionsvereinbarungen gehen, auch wenn diese im Konkreten noch Gegenstand von Verhandlungen sind. Aus Sicht des Klimaschutzes müssten die Reduktionen bis zum Jahr 2030 mindestens 30 % und bis zum Jahr 2050 weltweit 60 % - 80 % der Treibhausgasemissionen des Jahres 1990 betragen, um einen globalen Temperaturanstieg von mehr als 2 °C unwahrscheinlich zu machen. Setzt man den Emissionsreduktionsbedarf für die CO₂-Emissionen aus der Elektrizitätserzeugung gleich hoch an, so bedeutet dies, dass der CO₂-Ausstoß im Jahr 2030 um etwa 2.100 kt CO₂ niedriger sein muss als 1990. Unter Zugrundelegung der derzeitigen Emissionsfaktoren¹ und der Annahme, dass die Einsparung ausschließlich durch Nutzung von Kernenergie erzielt wird, bedeutet dies, dass 2030 rund 3.000.000 GWh zusätzlich in Kernkraftwerken erzeugt werden müssten – oder um mindestens 435 Kernkraftwerke mit 1 GWe Nennleistung² mehr in Betrieb sein müssten als derzeit. Geht man von der optimistischen Annahme aus, dass die ersten neuen Kernkraftwerke schon in fünf Jahren, d.h. 2012 in Betrieb gehen könnten, so müssten pro Jahr 24 Kernkraftwerke in Betrieb gehen. Das würde beinahe zu einer Verdoppelung der derzeitigen Zahl von Kernkraftwerken führen, mit im Schnitt höherer Nennleistung. Bei diesen Berechnungen wurden ausschließlich die CO₂-Einsparung, weder Kernkraftwerksstilllegungen noch der steigende Elektrizitätsbedarf berücksichtigt.

Derzeit verfügen jedoch ca. 2 Milliarden Menschen über keine Elektrizitätsversorgung, ein Mangel, der nach internationalen Absichtserklärungen möglichst rasch behoben werden soll. Entsprechend wird die Elektrizitätsnachfrage voraussichtlich sehr viel rascher zunehmen als der Gesamtenergieverbrauch. Die Projektionen schwanken beträchtlich, aber häufig wird von einer Verdoppelung bis ca. 2030 ausgegangen. Die Internationale Energieagentur [IEA 2004] schätzt, dass es zwischen 2000 und 2020 einen Zusatzbedarf von etwa 1400 bis 1700 GWe an elektrischer Energieerzeugungskapazität geben wird, bis 2030 einen weiteren Bedarf von 1000 bis 1300 GWe. Würde der Nuklearanteil mit annähernd 16 % gehalten, würde das bedeuten, dass bis 2030 zwischen 480 und 600 neue Kernkraftwerke in Betrieb gehen müssten³. Geht man wieder von der optimistischen Annahme aus, dass die ersten neuen Kernkraftwerke in fünf Jahren in Betrieb gehen könnten, sind das zwischen 27 und 34 Kernkraftwerke pro Jahr oder eines alle 10 bis 14 Tage - ein Gutteil davon in den Entwicklungsländern. Bei dieser Berechnung leistet die Kernenergie keinen Beitrag zur CO₂-Reduktion durch Ersatz fossiler Brennstoffe und auch Kernkraftwerksstilllegungen sind nicht berücksichtigt.

Sollte die Kernenergie zur Verringerung einer Energielücke infolge von Verknappung von Öl und Gas einen größeren Beitrag (mehr als 16 %) leisten, z.B. über die nukleare Produktion von Wasserstoff, so wäre eine entsprechend höhere Erzeugungskapazität erforderlich.

Geht man von einer Lebensdauer der Kernkraftwerke von 40 Jahren³ und einer Bauzeit von 5 Jahren für alle derzeit tatsächlich in Bau befindlichen Kernkraftwerken aus, so würde 2030 die installierte Leistung auf unter 100 GWe fallen [Zittel et al. 2006]. D.h. allein um den derzeitigen

¹ Beim gegenwärtigen Brennstoffmix Deutschlands sind das im Mittel 0,73 kt/GWh für fossile Kraftwerke; für Kernkraftwerke wird die Emission mit 0,025 kg CO_w/kWh angesetzt.

² bei 80 % Lastfaktor und 1 GWe Nennleistung jedes Kraftwerkes. Erfordernisse der Bereitstellung von Reserven für Spitzenanforderungen sind in den Abschätzungen nicht enthalten.

³ Die durchschnittliche Lebensdauer der stillgelegten Reaktoren, einschließlich einiger extrem kurzlebiger Pilotanlagen, liegt derzeit bei 22 Jahren.

Status zu halten, müssten in diesem Zeitraum weitere rund 260 GWe Nennleistung oder 18 neue KKW pro Jahr neu installiert werden.

Will man gleichzeitig die Stilllegung von älteren Kernkraftwerken kompensieren, den prognostizierten künftigen Stromverbrauch - im Ausmaß der bisherigen 16 % - decken und darüber hinaus die CO₂-Emissionen durch Ausweitung des Nuklearanteils an der Stromerzeugung senken, d.h. den Nuklearanteil auf deutlich mehr als 16 % steigern, so wären binnen weniger Jahre Neubauleistungen in der Größenordnung von rund 70 KKW pro Jahr erforderlich, auch wenn die oben genannten Zahlen nicht ohne weiteres addiert werden können. Wollte man die Kernenergie zusätzlich in neuen Verbrauchssektoren einsetzen – z.B. nuklearer Wasserstoff im Transportwesen, so lägen die Anforderungen noch höher. In einem der Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wird angenommen, dass Kernenergie im Jahre 2075 50 % der weltweiten Elektrizitätsproduktion liefert (3000 GWe installierte Nennleistung) und 75 % im Jahr 2100 (6500 GWe installierte Nennleistung). Selbst bei einer angenommenen Lebensdauer von Kernkraftwerken von 50 Jahren ergibt sich nach diesen Szenarien die Notwendigkeit, ca. 70 Reaktoren pro Jahr in Betrieb zu nehmen. [Feiverson 2003]

Selbstverständlich wird nicht erwartet, dass die Kernenergie all diese akkumulierten Anforderungen allein abdeckt: Es ist zu erwarten, dass Energieeffizienzmaßnahmen und Alternative Energien den Hauptteil übernehmen, und es ist zu hoffen, dass die Bedarfsprognosen infolge einer einsetzenden Energiewende Überschätzungen darstellen. Diese überschlägigen Maximalabschätzungen zeigen jedoch die Dimension des Problems auf und mögen als Warnung vor allzu großen Hoffnungen hinsichtlich eines zeitgerecht verfügbaren, wesentlichen Beitrages der Kernenergie zu den Energieproblemen der nahen Zukunft dienen.

8.2.2 Zeitrahmen

Aus der Klimadebatte ergeben sich zwei getrennt zu betrachtende Zeitperioden: zum einen der durch das völkerrechtlich bindende Kyoto-Protokoll festgelegte Zeitraum bis einschließlich der ersten Beurteilungsperiode 2008–2012, zum anderen die sich aus den Post-Koyto Maßnahmen ergebenden Perioden, die derzeit noch diskutiert werden. Nach dem Vorschlag der Europäischen Union wären dies die Zeiträume bis 2020 oder 2030 und bis 2050, für die Emissionsreduktionen in noch zu vereinbarenden Ausmaßen zu erreichen wären. Anders formuliert, müsste der Beitrag der Kernenergie – um in der ersten Beurteilungsperiode wirksam zu werden – innerhalb von 2 bis 6 Jahren erfolgen, im Post-Kyoto Prozess stünden rund 10 bis 40 Jahre zur Verfügung.

Die Zeiträume, die sich aus der sich abzeichnenden Energielücke ergeben, sind von ähnlicher Größenordnung. Der Anstieg des Stromverbrauches stellt wie oben dargestellt, ebenfalls bereits beträchtliche Anforderungen innerhalb der nächsten 20 Jahre.

Es geht also um die Frage, ob die Kernindustrie innerhalb von 1 bis 2, maximal 4 Jahrzehnten einen nennenswerten Beitrag leisten können.

8.2.3 Optionen

Um einen größeren Beitrag zur Energieproduktion zu erzielen, muss die durch Kernkraftwerke gelieferte Leistung erhöht werden. Dies bedeutet in der gegenwärtigen Phase eher abnehmen-

der Leistungsbereitstellung aufgrund von Kernkraftwerksstilllegungen, dass es nicht nur um die Leistungssteigerung, sondern auch um die Kompensation dieses Rückganges geht.

Der Rückgang kann durch Verlängerung der Lebensdauer der derzeit in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke reduziert bzw. verzögert werden. Dies ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil die Zahl der Kernkraftwerke, die nach den ursprünglichen Plänen demnächst stillgelegt werden sollten, beträchtlich ist, so dass der Beitrag der Kernenergie, trotz Errichtung neuer Anlagen, zunächst abnehmen, und nicht zunehmen wird. Der Beitrag der Kernenergie zu den sehr kurzfristigen Kyoto-Zielen kann nur über Lebensdauerverlängerungen beeinflusst werden. Allerdings kann bestenfalls der Rückgang verzögert werden, da innerhalb der 6 Jahre bis zum Auslaufen des ersten Kyoto Beurteilungszeitraumes kein Kernkraftwerk Strom ins Netz speisen wird, das sich derzeit noch nicht in Bau befindet.

Hinsichtlich der Entwicklung neuer Kernkraftwerkstypen werden aufgrund von Marktanalysen technologische Entwicklungen in zwei Richtungen verfolgt:

- Große, „inhärent sichere“ Reaktoren bis zu 1,5 GWe Nennleistung und
- Autonome Kleinanlagen mit Nennleistungen im Netz von 10 bis 100 (300) MWe.

[President's Council 2005], die weitestgehend automatisch betrieben werden können

[IAEA/NEA/IEA (2002)].

An der Entwicklung „inhärent sicherer“ Reaktoren wird seit etwa einem Jahrzehnt gearbeitet; es handelt sich um Reaktoren der III. und IV. Generation. Die Konzepte, ihre Stärken und Schwächen, sind im Beitrag zur Sicherheit der Kernkraftwerke kurz beschrieben. Einige Reaktoren der Generation III sind bereits in Betrieb, die Inbetriebnahme des ersten Reaktors der Generation IV wird nicht vor 2020 erwartet.

Die autonomen Kleinanlagen (mit Energie-Containern vergleichbar) werden in einer Instandhaltungsanlage zentral gewartet, wohin sie zum Nachbeladen verbracht werden. Erste Demonstrationsanlagen sollen 2015 fertig und auch genehmigt sein; der kommerzielle Einführungszeitpunkt liegt nach 2020.

Beide Entwicklungen brauchen Zeit, selbst wenn Synergien aus der parallelen Entwicklung der neuen Technologien und der neuen Betriebsweisen wahrscheinlich sind. Erfahrungen können erst mit deren Einführung und Anwendung der Prototypen gewonnen werden.

Neben den technischen Erfordernissen dürfen die wirtschaftlichen Randbedingungen eines liberalisierten Elektrizitätsmarktes nicht übersehen werden. Der Druck die Investitions- und Betriebskosten zu senken ist groß, auch wenn das Anziehen der Kosten für fossile Energieträger eine gewisse Erleichterung gebracht hat. Die Nuklearindustrie ist bemüht, die Möglichkeiten zur Senkung der hohen Investitionskosten zu nutzen, die da sind:

- Ausloten der „economics-of-scale“ (Nutzung größenbedingter Kostenvorteile);
- Einführen „schlanker“ Errichtungsmethoden;

- Verkürzen der Errichtungsdauer;
- Vereinheitlichung und Baureihen;
- Mehrblockanlagen;
- Vereinfachte Auslegung, verbesserte Anordnung, Verwenden von Modellen;
- Effiziente Bereitstellungs- und Leistungsvereinbarungen;
- Kosten- und Qualitätskontrollen;
- Effizientes Projektmanagement und
- Enge Zusammenarbeit und enges Zusammenwirken mit den zuständigen Genehmigungsbehörden.

In diesem Zusammenhang sind natürlich auch Bemühungen zu nennen, die politischen Randbedingungen zu Gunsten der nuklearen Option zu beeinflussen.

Unter diesen Randbedingungen soll ein günstiges Investitionsklima hergestellt werden, das hohe Investitionskosten zu günstigen Bedingungen zu finanzieren einlädt und Finanzierungsengpässe, wegen zu hohem Finanzierungsbedarf, zu vermeiden erlaubt. Es wird sich weisen, ob unter angespannten Finanzmärkten der Geldmarkt diese begünstigenden Eigenschaften annehmen kann.

8.3 Lebensdauererstreckung

Aufgrund der Schwierigkeiten, die wegen der mangelnden Akzeptanz in der Öffentlichkeit bei der Genehmigung von neuen Anlagen auftreten und wegen der abschreckend hohen Anfangsinvestitionen beim Neubau von Kernkraftwerken gibt es einen Trend zur Lebensdauererstreckung („Langzeitbetrieb“) von Kernkraftwerken. Dabei wird der Betrieb über die ursprünglich genehmigte oder vorgesehene Betriebszeit hinaus erstreckt, bis hin zur technischen Lebenserwartung. Für Anlagen, die in nächster Zukunft abgeschaltet werden sollten, liegt schon jetzt eine Welle von Anträgen zur Genehmigungserneuerung vor.

Werden alle Anträge zur Lebensdauererweiterung positiv beschieden, kann man davon ausgehen, dass die in den nächsten 20 Jahren prognostizierte Halbierung der Kernenergieleistung nicht stattfinden wird, sondern die Verringerung deutlich niedriger ausfällt. Geht man von einer vorgegebenen zeitlichen Entwicklung des Beitrages der Kernenergie aus, könnte diese Entwicklung einen Zeitpuffer schaffen und eine Chance für bessere Auslegungskonzepte und damit erhöhte Akzeptanz in der Öffentlichkeit bieten, – wenn man Kernenergiebefürwortern folgt.

Zweifellos werden Lebensdauererweiterungen auch Auswirkungen auf die Entwicklung von Herstellungskosten und Verbraucherpreise haben, denn Kraftwerke, die kurz vor der Schließung stehen, haben sich in der Regel längst amortisiert. Der Weiterbetrieb ist also sehr rentabel.

Es darf aber nicht unerwähnt bleiben, dass Lebensdauererweiterung mit besonderen und verschärften Sicherheitskontrollen einhergehen sollte, da bekanntlich im Allgemeinen die Wahrschein-

lichkeit für Versagen einzelner Komponenten oder Materialien mit zunehmendem Alter zunimmt. Auch sind jene Anlagen, welche zur Schließung anstünden, durchwegs ältere Anlagen (Generation I und ältere Generation II Anlagen), die nach Probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) in Hinblick auf die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen schweren Unfall um Faktoren zwischen 10 und 100 „über“ den gängigen Sicherheitsniveaus liegen (vgl. den Beitrag zur Nuklearen Sicherheit).

Hinsichtlich der Zeitgerechtheit der Kernenergieoption schafft die Lebensdauererstreckung bestehender Kernkraftwerke lediglich eine geringfügige Entlastung.

8.4 Neue Kernkraftwerke

Derzeit wird der Herstellzeitraum (Baubeginn bis Inbetriebnahme) für ein Standard-Kernkraftwerk mit 6 bis 8 Jahren angegeben, gegenüber etwa 10 Jahren zu Beginn der derzeitigen Kraftwerksgeneration. Für einen nennenswerten Ausbau der Kernenergie kommen allerdings nur Reaktortypen der nächsten und der übernächsten Generation in Frage. Für diese Reaktoren liegen teilweise jedoch erst Konzepte vor und für die wenigen bereits in Bau oder in Betrieb befindlichen Reaktoren der nächsten Generation (Generation III) fehlen derzeit noch die Erfahrungen mit Auslegung, Errichtung und Betrieb.

Aus der ursprünglichen Entwicklung der Kernenergie ist bekannt, dass in vielen Fällen Sicherheitsanforderungen bereits erprobte Techniken verlangen. Deswegen ist vor Betriebsgenehmigung nicht nur Erfahrung mit dem Betrieb von Komponenten, sondern auch mit dem Betrieb von Systemprototypen und ganzen Anlagen erforderlich. Weder verbesserte Druckwasserreaktoren (DWR: z.B. EPR) und Siedewasserreaktoren (SWR), noch „inhärent sichere“ Reaktor-Konzepte (ISR) können für den kommerziellen Betrieb zugelassen werden, ohne dass deren Prototypen ausführlich getestet wurden, und sie damit schon zum Zeitpunkt der Einführung eine hinreichend „erprobte“ Technologie darstellen.

Diese Entwicklungs- und Versuchszeiträume müssen zu dem reinen Errichtungszeitraum hinzugerechnet werden, was eine 15- bis 20-jährige Vorlaufzeit bedeuten kann. Zieht man die inzwischen vorhandenen umfangreichen Kenntnisse zur Auslegung und zum Betrieb von Kernkraftwerken in Betracht, dann werden die Prototypauslegung, die -planung und die Versuche für die am weitesten entwickelten Prototypen der derzeit in Entstehung befindlichen Kernkraftwerkskonzepte vermutlich von den oben genannten 15 bis 20 Jahren auf Zeiträume zwischen 8 und 14 Jahren reduzierbar sein. Sollten diese Projekte unmittelbar jetzt aufgegriffen werden, dann wird die Inbetriebnahme der ersten Anlagen frühestens auf 2020 geschätzt, d.h. dass sie in die Post-Kyoto Periode fallen.

Der hier skizzierte Zeitplan lässt wenig Raum für die Weiterentwicklung von „inhärent sicheren“ Reaktoren (ISR), die tolerant gegen Versagen sein und weiterentwickelte passive Sicherheitsfunktionen zur Minderung der Folgen von Unfallverläufen und für das Management von Unfällen verbesserte Eingriffmöglichkeiten haben sollen. Für die Vorkehrungen gegen schwere Unfälle werden ausführliche Nachweise geliefert werden müssen, die auch angemessen durch Versuche belegt sein müssen. Sogar nach der Genehmigung der Anlagenlinie wird eine Vielzahl von Prototypen-Tests und -Auswertungen durchgeführt werden müssen, was weitere 7 bis 10 Jahre erfordert. Mit einem Einführungserfolg von Kernkraftwerken mit fortgeschrittenem ISR-Konzept kann daher realistischer Weise erst zwischen 2030 und 2040 gerechnet werden. Erst von dieser

Generation von Kernkraftwerken könnte erwartet werden, dass sie die Toleranz für die Kernenergieoption in der Öffentlichkeit verbessern.

Der Zeitplan für Reaktoren mit völlig neuen physikalischen Konzepten (z.B. die mit einem Beschleuniger betriebenen Hochtemperaturreaktor-Konzepte) sieht in den nächsten Jahren erst Machbarkeitsuntersuchungen für getrennte Teilsysteme vor. Sie werden mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht vor 2018, also gegen Ende der oben angeführten Zeitspanne von 8 bis 14 Jahren, grundsätzlich verfügbar sein.

8.5 Rahmenbedingungen

8.5.1 Bisherige Leistungsentwicklung

Historisch gesehen wurde die maximale Netzleistungserhöhung durch Kernkraftwerke im Jahr 1985 mit 31 GWe/a erreicht; ab diesem Zeitpunkt ist sie auf 2 bis 9 GWe /a während der letzten paar Jahre gesunken.

Gegenwärtig nimmt der Anteil der Kernenergie an der Gesamtenergieerzeugung ab und dieser Prozess wird sich wahrscheinlich bis etwa 2020 beschleunigen, da die Inbetriebnahme der ersten Anlagen in den 60er Jahren erfolgte und die durchschnittliche Anlagenlebensdauer mit etwa 35 Jahren begrenzt ist. Weil Bestellungen für neue Kraftwerke in den letzten Jahren verschwindend gering waren, haben neue Anlagen diese Entwicklung nur geringfügig modifiziert.

Bisher wurden erst etwa 20 % der 537 Kernkraftwerke stillgelegt, wobei viele davon Prototypen waren, deren durchschnittliche Betriebsdauer bei nur zirka 7 Jahren lag. Mit Stichtag 21. Oktober 2004 waren 440 Kernkraftwerke in Betrieb und 25 Kernkraftwerke in Bau. Damit sind 365,5 GWe elektrische Kernenergieleistung installiert, und diese Leistung würde – entsprechend den Vorhersagen – auf 180 GWe um 2024 fallen. Nimmt man ein 2 %/a Wachstumsszenario für die Kernenergie an, so führt der eingeleitete Abfall 2021 zu einem Minimum bei 294 GWe, mit einem darauf folgenden Wiederanstieg.

Angesichts dieser Entwicklung ist ernsthaft die Frage zu stellen, ob der oben genannte Bedarf in der Größenordnung von 70 neuen Kernkraftwerken pro Jahr realistischer Weise geleistet werden kann, nur um den Stromanteil zu halten. In der Tat wird die Steigerungsrate der kernenergetischen Leistung ab dem Zeitpunkt, zu dem die neuen Anlagen verfügbar werden, mit etwa 1-2 % eingeschätzt [IEA 2004, EIA 2005]. Dies liegt deutlich unter dem Niveau, das zur Aufrechterhaltung des Kernenergieanteils von 16 % an der globalen Elektrizitätserzeugung bei Zugrundelegung des IEA-Wachstumsszenariums erforderlich wäre.

8.5.2 Sachkenntnis und Arbeitskräfte

Die ursprünglich hohe Attraktivität der Kernindustrie ist wegen der realistischeren Einschätzung ihrer Möglichkeiten und wegen des fortwährenden Sinkens der Auftragsbestände weitgehend verloren gegangen. Die Wirtschaftsentwicklung – die Suche nach verbessertem „shareholders' value“ und höheren Gewinnen – hat viele Hersteller und Betreiber zur Reduktion der Mitarbeiterzahlen veranlasst. Erfahrene Mitarbeiter sind zum Teil altersbedingt in den Ruhestand getreten, zum Teil wegen des derzeitigen Tiefs bei den Beschäftigten und wegen des geringen Stellenangebotes in diesem Sektor in andere Sektoren gewechselt. Der Zustrom von Nachwuchs von den Universitäten hat in Europa und den USA spürbar nachgelassen; viele Universitäten haben ihre Nuklearprogramme deutlich heruntergefahren, eine Reihe von Kernenergieforschungszentren sind weitgehend zerlegt und reorganisiert worden, um sich anderen Problemen zu widmen. Der Versuch, diesen Entwicklungen durch die Arbeit an neuen Konzepten entgegenzuhalten, ist nur in begrenztem Umfang geglückt. Dies hat zu einer – von der Nuklearindustrie mit Sorge beobachteten und in zahlreichen Tagungen der IAEA und der NEA angesprochenen – Lücke bei erfahrenem und gut ausgebildetem Personal geführt.

Die unverzichtbaren Beiträge, welche die spezialisierten Technischen Firmen (TSO) leisten, sind in vielen Fällen verloren gegangen, weil die kleinen Firmen sich an die Marktgegebenheiten anpassen und entstehende Märkte bearbeiten mussten. Dabei haben sie in vielen Fällen für neue und ergiebigere Aufgabengebiete ihre frühere nukleare Kernkompetenz aufgeben müssen.

Zusammenschlüsse von verschiedenen Anbietern und die geänderte Ausrichtung von zusammen anbietenden Konsortien hat zwar die unmittelbare Bedrohung durch die Nichtverfügbarkeit von geeigneten erfahrenen Mitarbeitern in der Industrie verringert, hat aber andererseits dazu geführt, dass einige Leistungsbereiche verwaist sind, insbesondere die Auslegung von Kernkraftwerken.

Als Module konzipierte Kernkraftwerke, die für mehrere Betriebsjahre wartungsfrei wären, könnten helfen, die angespannte Situation bei den geschulten Fachkräften zu verbessern. Insbesondere in Zusammenhang mit der Errichtung neuer Kernkraftwerke in den Entwicklungsländern gewinnen diese Anlagenkonzepte an Bedeutung. Der Anstieg des Energiebedarfes und die Wirtschaftsstruktur könnten die Errichtung von Kernkraftwerken für die Lieferanten gewinnbringend werden lassen. Die nur begrenzte Verfügbarkeit von erfahrenen Arbeitskräften und die geringe Bereitschaft zur Mobilität von erfahrenem Personal wären jedoch schon für konventionelle Kernkraftwerke ein größeres Problem.

Man kann in erster Näherung ansetzen, dass jedes neue Kernkraftwerksprojekt etwa 10 000 ausgebildete Arbeitskräfte über einen Zeitraum von 10 Jahren erfordert. Die derzeit eingesetzten Betriebsmannschaften und das Personal für wiederkehrende Instandhaltungsarbeiten können dafür nicht herangezogen werden, nicht zuletzt weil sie für den Betrieb der laufenden Anlagen gebraucht werden. Auch die spezialisierten Technischen Firmen (TSOs) werden schon für Teilbetriebsbereiche verantwortlich eingesetzt.

Somit wird es notwendig, einen neuen Kern von befähigtem und später erfahrenem Personal heranzubilden: Grundlagenkurse dauern mindestens 5 Jahre, die Heranbildung zur Entwicklung neuer Einrichtungen und Technologien dauert mindestens noch einmal 5 bis 10 Jahre mit an der Arbeit orientiertem Training on-the-job. Ein Wechsel vorgebildeter Interessenten aus anderen Branchen, die vergleichbare Fertigkeiten erfordern, wird durch die für die Kernenergie bestimm-

menden hohen Ansprüche an die Sicherheit und Dauerhaftigkeit, die in anderen Bereichen weniger ausgeprägt sind, erschwert.

Der Versuch, unvermittelt oder in nächster Zukunft in ein fortgeschrittenes Kerntechnik-Programm einzusteigen, würde höchst wahrscheinlich am Mangel an Fachleuten scheitern, weil die Verfügbarkeit von befähigten Arbeitskräften und die Beweglichkeit des Personals begrenzt sind. Die zeitgerechte Verfügbarkeit von Kernenergie in einem nennenswerten Ausmaß ist aber nur mit ausreichenden und erfahrenen Arbeitskadern erzielbar. Die derzeitige Entwicklung deutet aber nach wie vor auf einen Verlust an Kompetenz im Kernenergiesektor hin.

8.5.3 Wirtschaftliche und strukturelle Rahmenbedingungen

Die technologische Entwicklung hängt in großem Ausmaß von den ökonomischen und strukturellen Randbedingungen ab. Diese haben sich während der letzten Jahre dramatisch geändert und werden sich in der nächsten Zukunft auch noch weiter rasch verändern: Ein günstigeres, ruhiges Entwicklungsklima für die Kernenergie ist zur Zeit nicht in Sicht.

Die derzeit zu beobachtende Ausweitung großer Technologiekonzerne zu weltweit Agierenden ist weniger eine Folge von internem Wachstum, als von Zusammenschlüssen mit und Übernahmen von anderen Firmen. Diese erfolgen primär mit dem Ziel effizienterer Produktion und dementsprechend wird das Hauptaugenmerk auf Neuorganisation der Strukturen und Optimierung von Abläufen gelegt, weniger auf Technologie-Entwicklung. Das Verlagern konkret umrissener Technologie-Teilbereiche nach konzernstrategischen Gesichtspunkten ist Teil des Prozesses, bei dem Schlüsselfunktionen zur strategischen Steuerung in einer Hand bleiben.

Gleichzeitig ist eine gegenläufige Entwicklung zu beobachten: das Besinnen auf Kernkompetenzen und das „Outsourcen“ von Rand- und spezialisierten Teilbereichen. Aufgrund dieser Entwicklung hat während der letzten Dekade der Prozentsatz an Firmen zugenommen, die sich in hohem Maß auf fremde Quellen für ihre Technologie verlassen.

Nun könnte erwartet werden, dass die entstandenen größeren Strukturen eine stabilisierende Wirkung haben und sich eine gedeihliche Koexistenz der Konzerne mit den kleineren, spezialisierten Zulieferfirmen einstellt. Es zeigt sich jedoch, dass die Konzerne, auch infolge der weit verteilten Unternehmensleitungsstrukturen, einem ständigen Wandel unterliegen und dies einen raschen Wechsel von Partnern mit hoch spezialisierter Sachkenntnis zur Folge hat. Ähnlich wie sich kleine Boote auf stürmischer See nur schwer an Großschiffe andocken können, können die kleinen, spezialisierten Lieferfirmen von den großen Konzernen wegen des raschen Wandels nicht wirklich profitieren.

Diese Entwicklungen sind auch am Sektor Kerntechnikanbieter zu beobachten. Schon in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde die Verringerung der Anzahl der Hersteller und der technischen Unternehmen (TSO = Technical Support Organization) durch Zusammenschlüsse festgestellt. Diese war vor allem vom schrumpfenden Markt bestimmt, der seinerseits eine Folge mangelnder öffentlicher Akzeptanz für die Kerntechnologie war.

Diese Struktur ist einem dauerhaften Aufschwung der Kernenergie nicht förderlich, weil weder eine stabile Entwicklung der wichtigen TSOs erwartet werden kann, noch unmittelbar eine Konsolidierung in den großen Lieferantenfirmen für Nukleartechnologie.

8.5.4 Die Entwicklung des Marktes

Um Ersatz für die bestehenden Kernkraftwerke, die ihre geplante Lebenszeit in absehbarer Zeit erreichen werden, zeitgerecht zur Verfügung zu haben, wären Bestellungen neuer, technologisch weiterentwickelter Kernkraftwerke schon vor Jahren erforderlich gewesen. Eine Anzahl von Faktoren hat diese Weiterentwicklung aber nicht ermutigt: der grundsätzliche Mangel an Bestellungen, der schrumpfende Markt, die Programme zur Lebensdauerausweitung und die finanziellen Kürzungen von nuklearen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen, die ganz oder teilweise von der öffentlichen Hand gesponsert worden waren.

Die Lage hat sich in den allerletzten Jahren etwas verändert: Gezielte Verbesserung der Rahmenbedingungen durch politische Maßnahmen haben dazu geführt, dass eine Anzahl von Märkten für Kernkraftwerke anzieht, aber noch immer sind es Käufermärkte, d.h. sie sind für die Nuklearindustrie wirtschaftlich wenig attraktiv. Auch diese Entwicklung wird eher als Folge vertrauensbildender Maßnahmen gesehen, denn als längerfristig kommerziell interessante Ausweitung.

Die Fragen bleiben daher aufrecht: Kann ein Markt, der sich erst wieder etablieren muss, eine Technologie wieder hochbringen und mit ihr das technologische Wissen und Können? Gelingt dies auch bei den Niveauanforderungen, die für eine fortgeschrittenere Technologie notwendig sind? Vor allem: Leistet der Markt das alles in kurzer Zeit?

8.5.5 Öffentliche Akzeptanz

In einzelnen Staaten Europas hat das nuklearkritische Klima zu politischen Vorgaben (wie etwa dem Atomsperrgesetz in Österreich) geführt, die für die Weiterentwicklung der Kernenergie ungünstig waren. Die kritische Haltung zur Kernenergie hat sich bisher nicht wesentlich geändert: Eine öffentliche Umfrage in der EU im Jahr 2003 (Tabelle 8-1) hat ergeben, dass selbst wenn man voraussetzt, dass der nukleare Abfall sicher verwahrt werden kann, die Zustimmung zur Kernenergie als Option zur Stromerzeugung in 7 von 15 Staaten unter 50 % liegt, im EU-Schnitt gerade bei 50 %.

Tab. 8-1 **KERNENERGIE ALS EINE OPTION ZUR STROMERZEUGUNG**

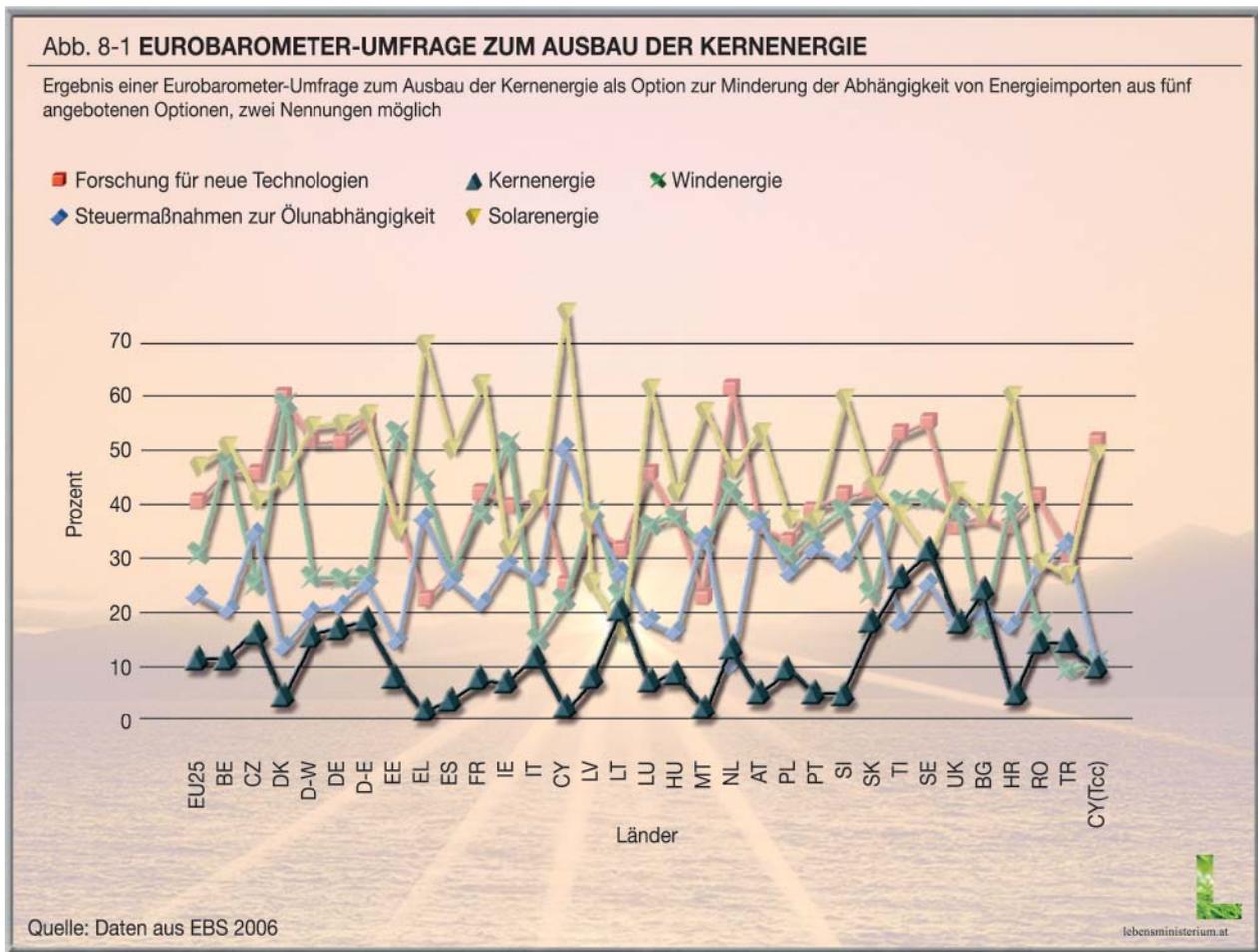
Staaten	Sicher ja	Eher ja	Eher nein	Absolut nein	Durchschnitt	Weiß nicht	Option Nuklear
	Resultat der Einstellungsumfragen in [%]						
A	8,0	16,6	23,2	38,6	1,93	13,6	5
B	13,1	46,9	11,01	5,9	2,87	23,1	11
DK	29,5	24,7	13,4	25,3	2,63	7,1	4
D-W	12,7	33,3	21,7	14,0	2,55	18,3	16
D-E	11,9	42,1	16,7	9,6	2,70	19,7	19
D	12,5	35,1	20,7	13,1	2,58	18,6	17
GR	19,0	29,4	13,9	8,1	2,84	29,6	2
E	9,0	22,6	17,9	10,0	2,52	40,6	4
F	15,8	43,4	13,6	8,7	2,81	18,6	8
IRL	7,2	30,3	14,8	10,7	2,54	37,0	7
I	13,7	40,8	11,4	6,6	2,85	27,5	13
L	14,9	40,5	18,8	12,9	2,66	12,9	7
NL	30,8	29,4	10,0	14,6	2,90	15,2	14
P	5,7	32,5	12,4	7,6	2,62	41,8	5
FIN	26,5	38,5	14,7	9,5	2,92	10,8	27
S	47,3	26,3	9,9	8,0	3,23	8,5	32
UK	14,0	38,6	13,0	7,9	2,80	26,5	18
EU 15	14,9	35,6	15,1	10,4	2,72	24,0	12
EU 25							12

Öffentliche Umfrage in den EU-Staaten zur Fragestellung: "Sofern der Abfall sicher verwahrt werden kann, sollte die Kernenergie eine Option zur Stromerzeugung in der Europäischen Union bleiben?" und Ergebnis einer Eurobarometer-Umfrage 2006: „Which of the following should the (national) Government mainly focus on the years to come to reduce our dependency on imported energy resources?“ (letzte Spalte)

Quelle: Ann Bisconti Research 2003 / EBS 2006



Eine Umfrage Ende 2005 [EBS 2006] ergab, dass nur 12 % der Befragten den Ausbau der Kernenergie als Option zur Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten aus fünf angebotenen Optionen (Ausbau von Solarenergie, Forschung für neue Technologien, Ausbau der Windenergie, Ausbau der Nuklearenergie, Ordnungsmaßnahmen zur Reduktion der Ölabhängigkeit) auswählten, obwohl zwei Nennungen möglich waren. Die nukleare Option wurde in fast allen Staaten deutlich hinter allen anderen Optionen gereiht.



Allerdings könnten Klimawandel und Energieengpässe längerfristig zu einem Umdenken führen. Auf Ebene der Politik und der Medien scheint in den letzten Monaten ein Anstieg der Akzeptanz zu verzeichnen zu sein. Dies könnte sich verstärken und auch die Bevölkerung erfassen. Allerdings darf nicht übersehen werden, dass gerade in den letzten Jahren eine Vielzahl von „Beinahe-Unfällen“ und Vertuschungsaffären aufgetreten sind, die das Vertrauen in die Sicherheit und zum Teil auch in die Redlichkeit der Kernanlagenbetreiber wieder erschüttert haben. Und man muss weiter davon ausgehen, dass der nächste größere Unfall mit großer Wahrscheinlichkeit wenigstens in Europa das endgültige „Aus“ für die Kernenergie darstellen wird.

Es ist daher derzeit nicht möglich, eine verlässliche Abschätzung des Verhaltens der Öffentlichkeit zu geben – mit großer Wahrscheinlichkeit wird es – wie bisher – räumlich sehr differenzierte und zum Großteil kritische Haltungen geben.

8.5.6 Politische Rahmenbedingungen

Die Politik kann den Aufschwung der Kernenergie in vielfacher Weise fördern – wiewohl die meisten der Vorschläge im Widerspruch zur freien Marktwirtschaft und zum liberalisierten Markt stehen: Verpflichtung zu nuklearem Anteil an der Stromerzeugung, Kapitalzuschüsse, steuerliche Begünstigungen, Ausfallhaftungen für Verzögerungen bei der Inbetriebnahme, Erleichterungen bei den Sicherheitsvorschriften und Genehmigungsverfahren, Einschränkung der bürgerlichen Einspruchsrechte, Einschränkungen der Vorsorgeverpflichtungen für den Müll, Benachteiligung konkurrierender Technologien, usw.. Solche und andere Maßnahmen werden derzeit

in den USA als Anreiz für den Bau neuer Kernkraftwerke gesetzt und auch in der EU lassen die Finanzierungsbedingungen für den Bau des Kernkraftwerkes in Olkiluoto in Finnland einige Erleichterungen vermuten.

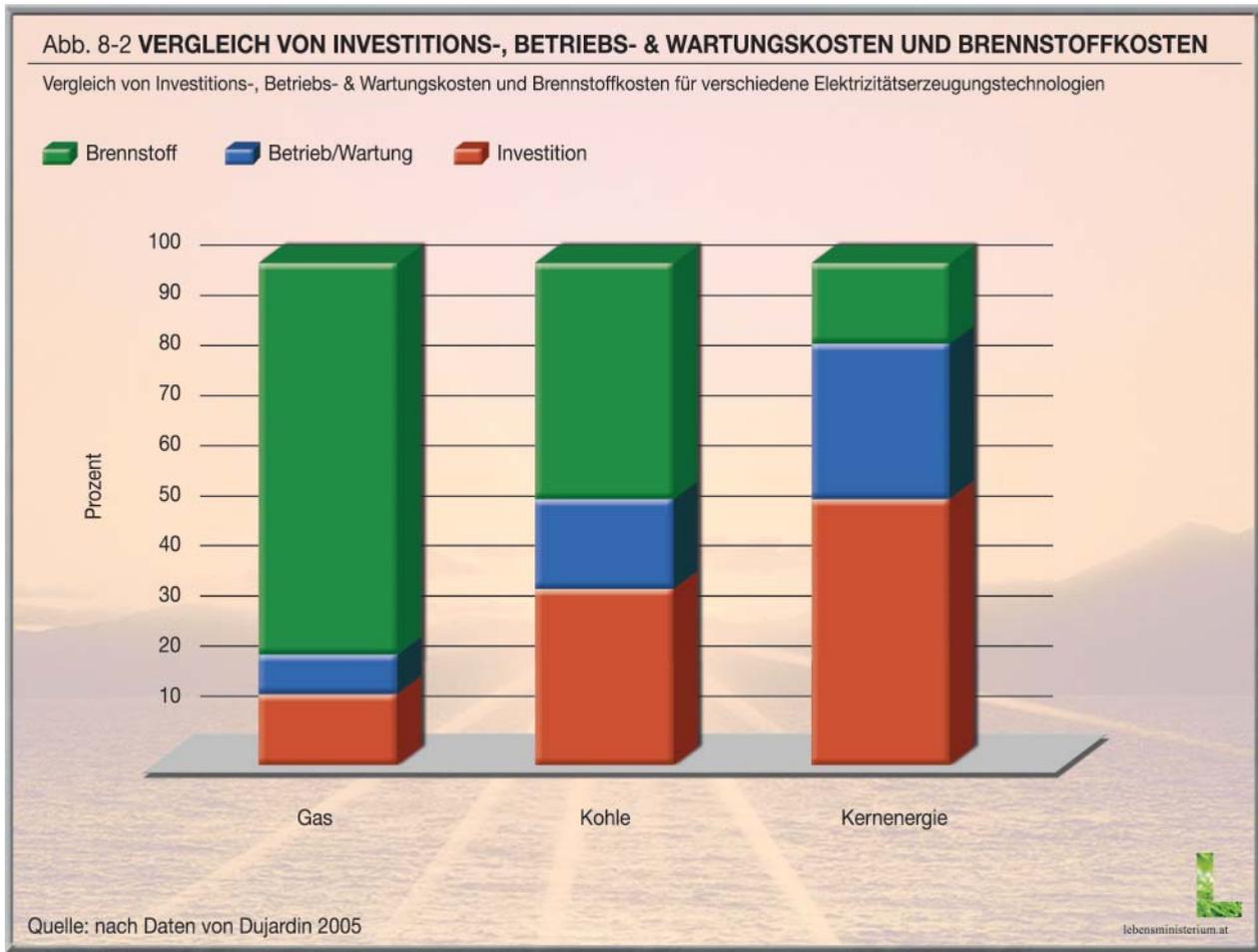
Es gibt auch Hinweise, dass sich angesichts der Verknappung der Ressourcen die Politikvorgaben für die Kernenergie wandeln könnten, und dies auch von den Genehmigungsbehörden, wahrscheinlich auch von einem gewissen Teil der Bevölkerung, mitgetragen und nicht nur von den Bedürfnissen der Betreiber vorangetrieben wird. Dies könnte die Inbetriebnahme neuer Anlagen erleichtern und beschleunigen und die Zeitgerechtheit fördern. Die Genehmigungsbehörden müssten jedoch sicherstellen, dass jede Verminderung der Anforderungen sicherheitsneutral passiert.

Seitens der Designer und Betreiber wird der Notwendigkeit zur Reduzierung der Herstellungskosten und des Betriebsaufwandes, sowie der Ressourcenverknappung Rechnung getragen. Die Risiko informierte Instandhaltung (RIM) ist ein Beispiel zur effizienteren Nutzung des vorhandenen Know-hows, Personals, der Ressourcen, der Zeit usw., die im Übrigen auch für eine Lösung „das Wichtige zuerst“ benutzt werden kann, wo immer nicht ausreichend Instandhaltungshilfen vorhanden sind. Die längere Verweilzeit des Brennstoffes im Reaktor, Instandhaltung während des Betriebs etc. sind weitere Hinweise für klare Schritte zu niedrigeren Kosten und die sparsame Verwendung von abnehmenden Ressourcen. Die benötigten Arbeitskräfte werden dadurch reduziert und unter Umständen der Betrieb weiterer Anlagen mit qualifiziertem Personal ermöglicht.

Die politischen Rahmenbedingungen werden jedoch alleine nicht in der Lage sein, den Ausbau der Kernenergie entscheidend zu beschleunigen, dazu sind sie zu wechselhaft. Sie könnten aber dennoch z.B. in einer für die Weichenstellung der energetischen Zukunft Europas wichtigen Phase ein für die Kernenergie günstigeres Klima erzeugen.

8.5.7 Finanzmärkte und Investitionen

Bei der Kernenergie liegen die notwendigen Anfangsinvestitionen wesentlich höher als bei anderen Technologien. Nach einer Zusammenstellung der OECD (Dujardin 2005) übersteigen bei der Kernenergie die Investitionskosten die Betriebs- und Brennstoffkosten zusammen (Abbildung 8-2). Dieser Kostenvergleich ist sehr stark von Annahmen, insbesondere hinsichtlich der Brennstoffkosten abhängig, und die absoluten Kosten werden in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich angegeben, jedenfalls aber ist das Verhältnis Anfangsinvestitionen zu Betriebs- und Brennstoffkosten der Tendenz nach gültig. Die steigenden Kosten fossiler Brennstoffe der letzten Monate reduzieren den Anteil der Anfangsinvestitionen bei den nicht-nuklearen Technologien noch weiter.



Das Problem der hohen Investitionskosten wird durch das große Gefahrenpotential der nuklearen Technologie und die Akzeptanzproblematik, der sich die Kernenergie ausgesetzt sieht, noch verschärft. Wegen der hohen Anfangsinvestition muss die Anlage eine gewisse Mindestdauer über in Betrieb sein, damit die Investoren den erwarteten Gewinn (ROI) lukrieren können. Die Statistik der bisher gebauten und in Betrieb genommenen Kernkraftwerke zeigt, dass ein hoher Prozentsatz davon weit vor Erreichen der geplanten Lebensdauer abgeschaltet wurde – die mittlere Lebensdauer liegt derzeit bei 22 Jahren, die geplante Lebensdauer bei 30 bis 40 Jahren. Besonders krass ist der Fall des Kernkraftwerkes auf Long Island in den USA, das wenige Tage nach Inbetriebnahme aufgrund einer Verfügung der Behörde endgültig außer Betrieb genommen wurde. Es ist allerdings festzuhalten, dass der Anteil der wesentlich verfrühten Abschaltungen zurückgegangen ist, und die mittlere Lebensdauer der Kernkraftwerke in den letzten Jahren zugenommen hat.

In Hinblick auf das enorme Schadenspotential und unter den Augen der kritischen Öffentlichkeit sind Aufsichtsbehörden und Betreiber gezwungen, sehr restriktive Maßnahmen zu setzen, d.h. auch bei scheinbar kleinen Anlässen die Anlage abzuschalten, manchmal sogar, wenn nur bei einer ähnlichen Anlage Probleme auftreten (zuletzt wurden z.B. vier schwedische Kernkraftwerke nach einem Zwischenfall im Kernkraftwerk Forsmark (im Block 1 am 25. Juli 2006) im August 2006 abgeschaltet). Wenn Anlagen wegen auftretender Schwierigkeiten immer wieder medienwirksam außer Betrieb genommen werden, verlieren diese als Anlageoption an Attraktivität.

Man kann den Eindruck gewinnen, dass Politik und Medien von einer Renaissance der Kernenergie sprechen, die Energiewirtschaft jedoch wesentlich zurückhaltender ist, und Investoren nach wie vor eher desinteressiert sind. Nach einer Analyse von Standard and Poors 2006 ist die Entwicklung einer neuen Generation von Kernkraftwerken im freigegebenen Energiemarkt ein hochriskantes Unternehmen angesichts der langen Entwicklungszeiten und der hohen Kapitalkosten. Die Standortfragen werden heute für sensitiver als in den 1970er und 1980er Jahren gehalten, wie die meisten Anlagen gebaut wurden. Die politische Unterstützung wird unsicher und abhängig vom Umgang mit den Sicherheitsproblemen bestehender Kernanlagen weltweit bleiben. Noch „ein Tschernobyl“ kann die derzeitige positive Stimmung rasch abkühlen lassen. Grundsätzliche Fragen, wie die Lagerung nuklearen Abfalls und ein weitreichender sozialer Konsens werden nach wie vor als notwendig betrachtet, bevor eine große potentielle Renaissance der Kernenergie möglich ist. [Standard and Poors 2006]

Allein in Europa wird bei einem „Business-as-usual“ Szenario mit einem Investitionsbedarf von rund 2 Trillionen USD in den Sektor Energie bis 2030 gerechnet, davon etwas mehr als die Hälfte für Elektrizität [IEA 2003]. Bei einem derartigen Investitionsangebot und –bedarf erscheint es zweifelhaft, dass Teile dieses enormen Investitionsvolumens, die für den zeitgerechten Ausbau der Kernenergie relativ kurzfristig erforderlich werden würden, gerade für die unsicherste der Anlageformen, für die Kernenergie, aufgebracht werden könnten.

8.6 Das Nuklearabfallproblem

Ein substantieller Ausbau der Kernenergie – ob konventionelle Reaktoren oder schnelle Brutreaktoren – bringt jedenfalls zusätzliche, substantielle Mengen an hochradioaktivem Müll mit sich. Wenn auch Anstrengungen unternommen werden, die Arbeit an einem der kontroversiellsten Sachgebiete der Nuklearenergie, dem Abfallproblem, zu intensivieren, so ist es doch weit davon entfernt, in absehbarer Zeit gelöst werden zu können. Es sind keine Alternativen zur Hand, die von der Öffentlichkeit gebilligt würden.

Das Problem hat eine andere Qualität als der Betrieb von Kernkraftwerken; es wird dominiert von den unüberschaubar langen Zeiträumen, während derer der hochradioaktive Abfall (HLW) Aufmerksamkeit beansprucht und deswegen eine Belastung für die Gesellschaft darstellt. Die Behörden in Deutschland z.B. verlangen derzeit eine nachweislich sichere Lagerung auf eine Million Jahre. Oberflächennahe Lagerung stellt keine Lösung dar, sondern gibt das Problem nur an alle kommenden Generationen weiter. Die unzugängliche Lagerung in tiefen geologischen Schichten überbürdet das Problem ebenfalls auf spätere Generationen, nur mit Zeitverzug und der Unsicherheit, ob die Generationen, die mit dem Austritt der Radioaktivität konfrontiert werden, in der Lage sein werden, mit radioaktiven Stoffen in diesen großen Mengen umzugehen.

Einige andere, eventuell vielversprechendere Konzepte mit dem HLW umzugehen, müssten noch weiter untersucht werden, und sollten – wenn sie sich als machbar erweisen – umgesetzt werden, solange Kernkraftwerke betrieben werden. Die Transmutation der Aktiniden (der Anteil von Isotopen am Abfall mit den höchsten Halbwertszeiten) oder das „Verbrennen“ von Abfallanteilen kann nur sinnvoll betrieben werden, wenn gleichzeitig ein profitables Leistungsunternehmen zur Finanzierung vorhanden ist. Gleichzeitig darf die Lösung nicht einen wesentlichen Teil der in Kernkraftwerken produzierten Energie wieder verschlingen. Daher muss die HLW Zwischenlagerung auch

als zeitkritischer Prozess gesehen werden. Welche Mengen mit welchen Eigenschaften verarbeitet werden können, ist von der Reaktortechnologie und deren Weiterentwicklungen abhängig.

Die über viele Jahre offiziell geübte „wait-and-see“ Herangehensweise, ohne klare Policy-Vorgaben, sowie das derzeit fehlende Verständnis von Verantwortlichkeiten, haben jedoch zu einer systematischen Verzögerung möglicherweise erfolgversprechender Versuche, das Problem zu lösen, geführt. Wenn neue Kernkraftwerke in großem Stil entwickelt und gebaut werden sollen, dann sollten die Abfallstrategien und Technologien parallel dazu entwickelt und umgesetzt werden. Dazu müsste schon jetzt die Aufgabenstellung an die Nuklearindustrie wesentlich erweitert werden und die Anforderungen an Lösungen des Abfallproblems klar definiert werden. Die erforderliche Ausrichtung der Politikvorgaben leitet sich vom Ziel, öffentliche Akzeptanz zu erlangen, ab und von der Notwendigkeit, Finanzierungsmodelle für die Lagerung oder Beseitigung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle zu entwickeln.

Ohne gute Vorschläge für eine echte und zeitgleich verfügbare Lösung, statt einer örtlichen und/oder zeitlichen Verlagerung des Problems, stellt das Müllproblem ein ernstzunehmendes Hindernis für den zeitgerechten Ausbau der Kernenergie dar.

8.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Obwohl häufig als möglicher wesentlicher Beitrag zum Erreichen der Ziele des Kyoto Protokolls und als wichtiger Beitrag zur Befriedigung des Energiebedarfes der Welt propagiert, ist offenkundig, dass die Nuklearkoption, kurz- und mittelfristig diese Erwartungen nicht erfüllen können.

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen, die erforderlich ist, um die Kyoto-Ziele bzw. die Post-Kyoto Vorstellungen der EU zu erfüllen, erfordert bis 2010 den Ersatz von etwa 70 GWe Leistung und bis 2030 rund 380 GWe Leistung aus Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen. Wollte man dies ausschließlich durch Kernenergie abdecken, müssten bis 2030 etwa 14 Kernkraftwerke der 1 GWe-Dimension, in Summe etwa 425, errichtet werden. Will man – ohne Berücksichtigung der Klimaschutzziele – nur den gegenwärtigen Nuklearanteil von 16 % im Zuge des sich bis 2030 etwa verdoppelnden Elektrizitätsbedarfes halten, müssten etwa 15 Kernkraftwerke von etwa 1 GWe pro Jahr errichtet werden. Will man beide Ziele erreichen, müsste die Kernenergie deutlich schneller wachsen, als die Summe aus beiden Vorhaben ergibt. Die Verluste durch Stilllegungen wären zusätzlich noch zu kompensieren.

Die Steigerungsrate der kernenergetischen Leistung wird ab dem Zeitpunkt, zu dem die neuen Anlagen verfügbar werden, mit etwa 1-2 % eingeschätzt. Dies liegt deutlich unter dem Niveau, das zur Aufrechterhaltung des Kernenergieanteils von 16 % an der globalen Elektrizitätserzeugung bei Zugrundelegung des IEA-Wachstumsszenariums erforderlich wäre.

Die Nuklearnetzleistung hat ihr Maximum im Jahr 1985 erreicht und ist seither gefallen. Alle Szenarien lassen erwarten, dass sie aufgrund der Abschaltung einer steigenden Zahl von Kernkraftwerken, deren Lebensdauer erreicht wird, mindestens bis 2020 weiter fallen wird. Es ist daher von der Kernenergie in der ersten Kyoto Erfüllungsperiode (2008-2012) – wahrscheinlich aber auch bis 2020 – kein nennenswerter Beitrag zu erwarten. Die in vielen Fällen angestrebte Erstreckung der Lebensdauer (LTO) alter Anlagen kann nur den Rückgang mindern – allerdings

um den Preis, dass alte, weniger sichere Anlagen der ersten und zweiten Generation länger betrieben werden.

Aus Gründen der Sicherheit und wegen der geringen Akzeptanz der Kernenergie durch die Öffentlichkeit kann ein wesentlicher Anstieg nur erwartet werden, wenn verbesserte Versionen der gegenwärtigen Druck- und Siedewasserreaktoren oder, wahrscheinlicher, eine neue Generation von „inhärent sicheren“ Reaktoren für die kommerzielle Elektrizitätserzeugung zur Verfügung stehen. Es wird geschätzt, dass die Prototypen zwischen 2015 und 2020 zur Verfügung stehen werden. Die Durchdringung des Marktes erfordert etwa ein weiteres Jahrzehnt.

Gegenwärtig ist eine Verknappung von qualifizierten und erfahrenen Arbeitskräften in der Kernindustrie, speziell in der Entwicklung, festzustellen. An den Universitäten und Forschungsinstituten wird nicht ausreichend Nachwuchs ausgebildet. Die Verknappung betrifft die in Betrieb befindlichen Anlagen, viel mehr aber den Bedarf an zusätzlichen Arbeitskräften für die Entwicklung neuer Technologien und zusätzlicher Kernkraftkapazitäten. Die Zeit für Anwerbung und Ausbildung der benötigten Fachkräfte muss mit etwa 5 bis 10 Jahren veranschlagt werden. Auch dies könnte eine wesentliche Einschränkung für die zeitgerechte Verfügbarkeit eines erhöhten Beitrages der Kernenergie zum globalen Energieaufkommen darstellen.

Die wirtschaftlichen und strukturellen Rahmenbedingungen – viel Bewegung im Bereich der großen Nuklearfirmen und Verlust an spezialisierten Technischen Support Organisationen (TSO) – sind einem dauerhaften Aufschwung der Kernenergie nicht förderlich. Es kann aber weder eine stabile Entwicklung der wichtigen TSOs erwartet werden, noch unmittelbar eine Konsolidierung unter den großen Lieferantenfirmen für Nukleartechnologie. Auch der Markt ist derzeit nicht stark genug, diese voranzutreiben.

Die Akzeptanz der Kernenergie in der Öffentlichkeit hat keine essentielle Änderung erfahren, die weitreichenden Vorbehalte zeigen sich in Europa in praktisch jeder Umfrage, allerdings mit regionalen Unterschieden. Ob Klimawandel und Energiesicherheitsprobleme zu einem Umschwung führen bleibt angesichts der immer wieder auftretenden ernststen Zwischenfälle in Kernkraftanlagen in aller Welt zu bezweifeln.

In einzelnen Ländern wird seitens der Politik versucht, Investoren Anreize zu bieten; dennoch bleiben die hohen Anfangsinvestitionen, die ungelösten Probleme der Sicherheit und der Abfallentsorgung sowie die fehlende Akzeptanz in der Bevölkerung vor allem in den westlichen Demokratien ein beträchtliches Hemmnis für den Ausbau der Kernenergie.

Es liegt immer noch kein realistisches Konzept für die Abfalllagerung oder Abfallentsorgung vor. Die anspruchsvolleren Konzepte, wie das „Verbrennen“ und die Transmutation der Aktiniden sind nur in naher Verbindung mit in Betrieb stehenden Kernkraftwerken zu sehen, und zwar sowohl aus technischen als auch aus finanziellen Gründen. So sollten zukünftige Kernkraftwerke Vorkehrungen für Abfallentsorgungseinrichtungen einschließen. Diese müssten parallel mit den Kernkraftwerken entwickelt werden. Die Abfallentsorgung könnte sich jedoch als das schwierigere und zeitaufwändigere Problem erweisen, und so ebenfalls die zeitgerechte Verfügbarkeit der Kernenergieoption in Frage stellen.

In Summe muss die Möglichkeit der Kernenergieoption zeitgerecht verfügbar sein, um einen signifikanten Beitrag zu den großen Herausforderungen, Klimawandel, Energiebedarfszuwachs

und Energielücke durch Verknappung von Öl und Gas, zu liefern, in mehrfacher Hinsicht mit großer Skepsis betrachtet werden. Kurz- und mittelfristig ist kein über den derzeitigen hinausgehender Beitrag zu erwarten; bei für die Kernenergie günstigen Rahmenbedingungen könnte vielleicht in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein nennenswerter Ausbau stattfinden.

8.8 Literatur

- ACUS (1999): An Appropriate Role for Nuclear Power in meeting Global Energy Needs, The Atlantic Council of the United States, (February 1999)
- AIE (1998): Electricity Market Competition and Nuclear Power, 23ème AIE Symposium, 9-11 Paris, France, (September 1998)
- AIE (2004): AIE, Competition in Electricity Markets, AIE, Paris, France, (2004)
- AIE (2005): World Energy Consumption, AIE, Paris, France, (2005)
- Bermingham, J. R. (2006): PeakOil (World-Watch Institute) Commented, Denver 2006
- Boardman, C. E., C. E. Walter, M. L. Thompson and Ch. S. Ehrman (2002): The Separations Technology and Transmutation Systems (STATS) Report: Implications for Nuclear Power Growth and Energy Sufficiency, National Policy Analysis, 2002
- CCICED (2005): Recommendations to the Chinese Government on the Formulation of China's Eleventh Five-Year Plan, China Council for International Cooperation on Environment and Development, Peijing 2005
- de Sampaio Nunes, P. (2001): Strategies for a Sustainable Development of the Energy Supply, ILK Symposium "Opportunities and Risks of Nuclear Power" 26./27.04.01
- Dujardin, Th. (2005): Nuclear Energy, Climate Change and Economics. Lecture given at the COP 11 in Montreal, Canada
- EBS (2006): Attitudes towards Energy. Special Eurobarometer 247 / Wave 64.2 - TNS Opinion & Social. http://europa.eu.int/comm/public_opinion/index_en.htm
- EIA (2005): Energy Information Administration, 2005: International Energy Outlook 2004. DOE/EIA-0484(2006), www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html. U.S. Department of Energy. Washington, DC 20585
- EPRI (2006): Nuclear Plant Deployment, Electric Power Research Institute (EPRI) 2006 Portfolio, Palo Alto 2006
- EU 2000: EK Green Paper - Towards a European strategy for the security of energy supply
COM(2000) 769, November 2000
- EU 2006: EK Green Paper - A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy {SEC(2006) 317}
- Feiverson, H. A. (2003): Nuclear Power, Nuclear Proliferation and Global Warming, Forum on Physics and Society of the America Physical Society, January 2003

Foulke, L. R. (2004): A Perspective: Status and Future of Nuclear Power in the United States, ANS LaGrange Park, IL, 2004

Holdren, P. (1997): Federal Energy Research and Development for the Challenges of the 21st Century: The 1997 PCAST Study and its Relevance to Provisions of S.597: .“ 18 July 2001
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/library/livre-vert-en.pdf

IAEA (1991): INSAG-4 Safety Culture IAEA, Vienna 1991

IAEA (2002): Improving Economics And Safety Of Water Cooled Reactors: Proven Means And New Approaches, IAEA-TECDOC-1290, ISSN 1011-4289, IAEA, (May 2002)

IAEA (2003): Comparison of energy sources in terms of their full-energy-chain emission factors of greenhouse gases, IAEA-TECDOC-892, International Atomic Energy Agency, Vienna (2003)

IAEA (2004a) Status of Advanced LWR Designs, IAEA Light Water Cooled Reactor Project, Nuclear Power Technology Development Section, TECDOC-1391, Vienna, (2004)

IAEA (2004b) Improving Economics and safety of water-Cooled Reactors: Proven Means and New Approaches. IAEA Light Water Cooled Reactor Project, Nuclear Power Technology Development Section, TECDOC-1290, Vienna, (2004)

IAEA (2005a): IAEA 8th Scientific Forum 2005, Vienna, Austria (September 2005)

IAEA (2005b): INSAG-15 Key Practical Issues in Strengthening Safety Culture IAEA, Vienna 2005

IAEA/NEA/IEA (2002) IAEA, OECD/NEA, IEA, Eds., Innovative Nuclear Reactor Development, Opportunities for International Co-operation, „Three-Agency Study“: Available through: IAEA Nuclear Power Technology Development Section, Vienna, Paris, (2002)
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/innovativenuclear2002.pdf>

IEA (2003): International Energy Agency, 2003: Energy to 2050 Scenarios for a Sustainable Future. Paris, France

IEA (2004): International Energy Agency, 2004: World Energy Outlook 2004. Paris, France
http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1266

IEE (2004): The Energy Portfolio, 2 years on, IEE, London 2004

IEE (2005): The Energy White Paper, Two Years On Challenges for the UK Energy Policy, IEE, London 2005

INPO (2004): Principles for a Strong Nuclear Safety Culture, INPO, Washington 2004

Kubel, E. Jr. (2005): Editorial: Nuclear-Energy Bus Picking Up Speed, October 7, 2005

Lackner, K.S., R. Wilson and H-J. Ziock (2000): Free-Market Approaches to Controlling Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere: a discussion of the Scientific Basis „Global Foundation Conference on „Global Warming and Energy Policy”, Eds.: Kursunuglu, Mintz and Perlmutter, Kluwer Academic/Plenum Press New York, Boston, Dordrecht, London and Moscow, (2000)

Makhijani, A. and A. Seth (1997): The Use of Weapons Plutonium as Reactor Fuel, IEER 1997

Meier, P.J. (2002): Life-Cycle Assessment of Electricity Generation Systems and Applications for Climate Change Policy Analysis, University of Wisconsin Report UWFD-1181, (August 2002)

MIT (2003): The Future of Nuclear Power, An interdisciplinary MIT study, (July 2003)

Moniz, E. J. (2005): MIT Tech Talk, Energy, MIT, Boston 2005

Moniz, E. J. and M. A. Kenderdine (2003): Meeting Energy Challenges: Technology and Policy, Physics Today, 2003

NERI (2005): NERI — 2004 Annual Report, Washington D.C. 2005

OECD (1998): Nuclear Power and Climate Change, Organization for Economic Co-operation Development (OECD) report, OECD, (April 1998)

OECD (2004): Collective Statement Concerning Nuclear Safety Research, Capabilities and Expertise in Support of Efficient and Effective Regulation of Nuclear Power Plants, Paris © OECD 2004

OLGA (2004): Science and Technology to Meet our Energy Needs, American Chemical Society – Office of Legislative and Government Affairs, Washington D.C. 2004

Orbach, R. L. and W. D. Magwood (2004): Advanced Computational Materials Science: Application to Fusion and Generation to Fusion and Generation-IV Fission Reactors, Conference Proc. Washington 2004

President’s Council (2005): President’s Council of Advisors on Science and Technology S&T Collaboration: Ideas for Enhancing European-American Cooperation 5 October 2004 Dr. James DeCorpo, Technical Director

Rothwell, G. (2003): Can Nuclear Power Compete? Center for Economic Policy, Washington D.C. 2003

Shlyakhter, A., K. Stadie and R. Wilson (2001): Constraints limiting the expansion of nuclear energy, World Strategy Council, Washington DC., (2001)

TOPS / NERAC (2001): Research Stanford University Report by the Tops Task Force of the Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC): Technological Opportunities to Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems (TOPS) Final Report 2001, Washington DC. 2001

University of Chicago (2004): „Nuclear Power Competitive With Coal & Natural Gas“
September 20, 2004

Voß, A. (2001): The Ability of the Various Types of Power Generation to Compete on the Liberalized Market; VGB Power Tech 4/2001

WBCSD (2005): Energy & Climate Change: Sharpening the focus for action - a business perspective, Business & Sustainable Development News, Energy & Climate WBCSD, 2005

Wilson, R. (2000): The Changing Need for A Breeder Reactor, in Proceedings of the Annual Symposium, Uranium and Nuclear Energy: 1997-1999, The Uranium Institute, London, Nuclear Energy 39, 99-106, (2000)

9 Kernenergie und Kyoto-Protokoll in Perspektive*

Anthony Froggatt

Februar 2006, geringfügige Aktualisierungen September 2006

Inhaltsverzeichnis

9	Kernenergie und Kyoto-Protokoll in Perspektive*	204
9.1	Prognose des weltweiten Energieverbrauchs	204
9.2	Ist eine Niedrig - Emissionswirtschaft möglich?	205
9.3	Dynamik des Energiebedarfs in der Europäischen Union	206
9.4	Kernkraftwerke: Eine relativ teure Maßnahme zur CO ₂ -Reduktion	207
9.5	Kernenergie in Schwellenländern	209
9.6	Ausweitung der Verwendung von Kernenergie	211
9.7	Schlussfolgerungen	213
9.8	Zusammenfassung	214
9.9	Literatur	215

* Dieser Artikel ist auf der Grundlage des Hintergrundpapiers „Nuclear Energy and Kyoto-Protocol in Perspective“ von Peter Biermayr, Manfred Heindler, Reinhard Haas, Brigitte Sebesta, November 2004, unveröffentlicht, entstanden.

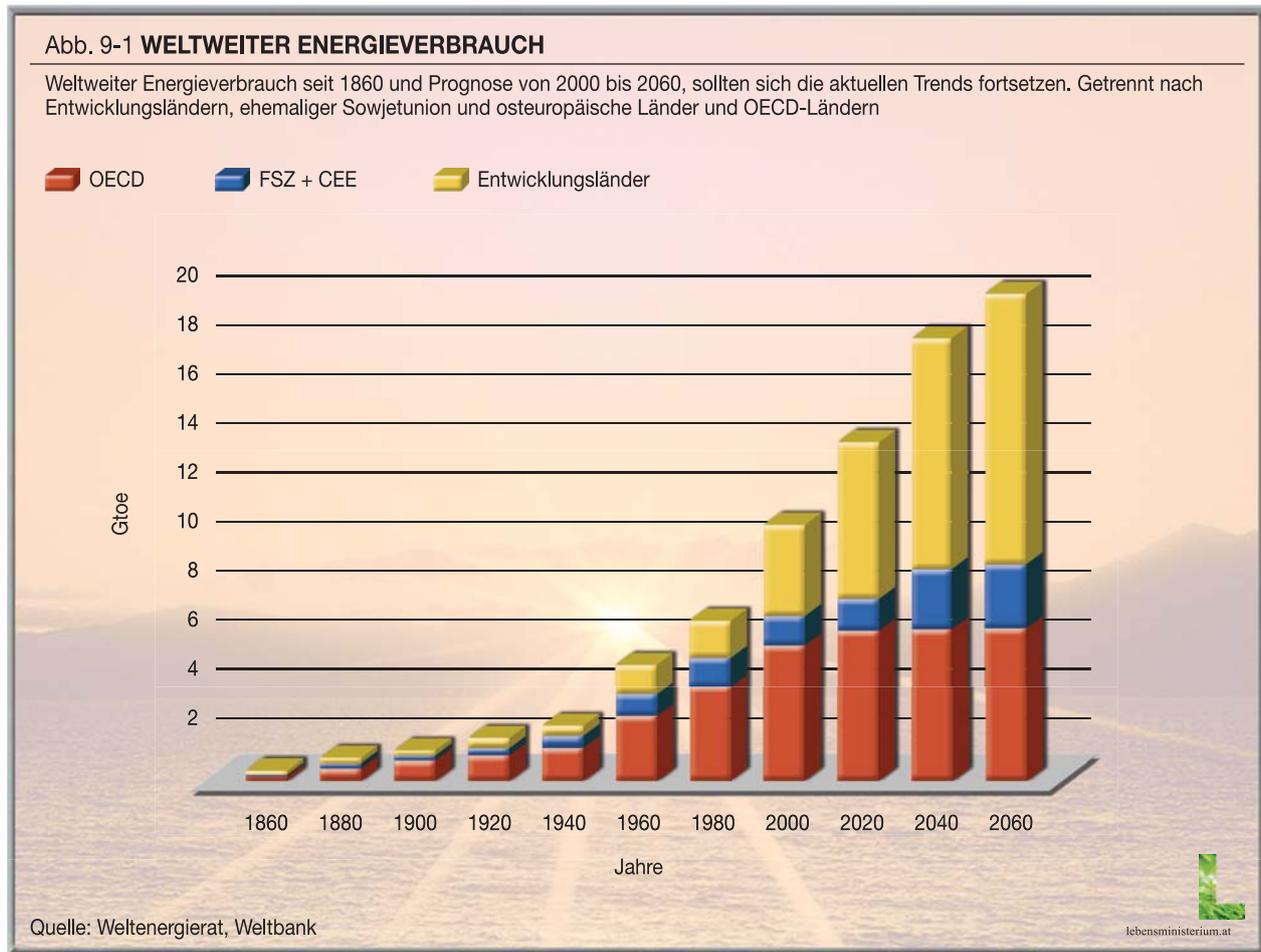
9 Kernenergie und Kyoto-Protokoll in Perspektive*

9.1 *Prognose des weltweiten Energieverbrauchs*

Der weltweite Energieverbrauch erhöht sich Jahr für Jahr. Im Jahre 2004 betrug der weltweite Durchschnitt für den Stromverbrauchsanstieg 4,3 %, wobei der höchste Anstieg im asiatisch-pazifischen Raum zu verzeichnen war, und für Kontinentaleuropa 8,9 % und Nordamerika 1,6 % betrug [BP 2005]. Es handelt sich somit nicht nur um den Stromverbrauchsanstieg in Entwicklungsländern, die den Anschluss an die Länder des Nordens anstreben, sondern um einen weltweiten Anstieg. Abbildung 9-1 zeigt den prognostizierten Zuwachs beim weltweiten Energieverbrauch in den nächsten 50 Jahren. Demnach betrug der weltweite kommerzielle Energieverbrauch im Jahr 2004 rund 10 Gt Öläquivalent und würde sich nach diesem Szenario innerhalb der nächsten 50 Jahre verdoppeln.

Bei obigem Referenzfall der Internationalen Energieagentur (IEA) steigen die CO₂-Emissionen stark an, um 62 % zwischen 2002-2030. Das ist vor allem auf den erhöhten Energieverbrauch zurückzuführen. Davon würde der angestiegene CO₂-Ausstoß zu 33 % auf Nordamerika, zu 20 % auf Westeuropa und zu 20 % auf die asiatisch-pazifischen OECD-Länder fallen. Der größte Anstieg wird für die Schwellenländer vorhergesagt, nämlich 40 %, wie auch für die großen Entwicklungsländer China, Indien, Indonesien und Brasilien mit 120 bis 160 %.

* Dieser Artikel ist auf der Grundlage des Hintergrundpapiers „Nuclear Energy and Kyoto-Protocol in Perspective“ von Peter Biermayr, Manfred Heindler, Reinhard Haas, Brigitte Sebesta, November 2004, unveröffentlicht, entstanden.



Die Hälfte des prognostizierten Emissionsanstiegs der Periode 2002 bis 2030 entsteht im Energiesektor, und davon etwa ein Drittel aus der Energieerzeugung mit Kohle. Der zweite Schlüssel-sektor ist der Verkehr, der für etwa 26 % des Emissionsanstiegs verantwortlich ist.

9.2 Ist eine Niedrig - Emissionswirtschaft möglich?

Das „Business-as-usual“ - Szenario der IEA rechnet für die nächsten drei Jahrzehnte mit einem jährlichen Energieverbrauchsanstieg von 1,7 %. Das würde enormer 16 Billionen \$ an weltweiten Investitionen bedürfen und damit 4,5 % der gesamten Investitionen zwischen 2001 – 2030 verschlingen. Für OECD- Europa wird mit rund 2 Billionen \$ an Investition in den Sektor Energie für diese Periode gerechnet. Sowohl in Europa als auch weltweit wird der Großteil der Investitionen für den Stromsektor benötigt werden, mit einem Gesamtinvestitionsbedarf von 10 Billionen \$, für Europa allein von rund 1,1 Billionen \$. Das sind die Kosten für die Errichtung von 650 GW an neuer Kapazität einschließlich des Ersatzes von 330 GW bestehender Kapazitäten. [IEA 2003]

Der Umfang an notwendigen Investitionen unterstreicht die Bedeutung des nächsten Jahrzehnts für die Weichenstellung im Energiesektor. Da Kraftwerke und Infrastruktur in der Regel etwa 50 Jahre in Verwendung bleiben, legen die Entscheidungen über die eingesetzten Brennstoffe das Emissionsniveau für die nächsten Jahrzehnte fest.

Zusätzlich zu dem Referenzszenario („Business-as-usual“) untersuchte die IEA auch die Auswirkungen von energiepolitischen Maßnahmen, die zur Zeit diskutiert werden, um die CO₂-Emissionen und die Importabhängigkeit zu reduzieren. Dieses Alternativszenario führte nicht zu einem Anstieg der Kernenergienutzung, sondern vielmehr zu einer Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien, der Kogeneration von Strom und Wärme und verbesserte Energieeffizienz. Das Alternativszenario führte zu einem 30 % niedrigerem Investitionsbedarf aufgrund geringerer Kosten für die Transmissions- und Distributionssektoren. [IEA 2003]

Wenn das Alternativszenario umgesetzt würde, könnte zumindest eine Stabilisierung des CO₂-Ausstoßes durch den Energiesektor im Jahre 2030 auf dem Niveau von 2000 erreicht werden. Die IEA meint: *„Das Alternativszenario zeigt auf, dass bei einer Intensivierung der bestehenden Maßnahmen und der Umsetzung neuer Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen und des Stromverbrauchs eine beträchtliche CO₂-Reduktion erzielt würde.“*

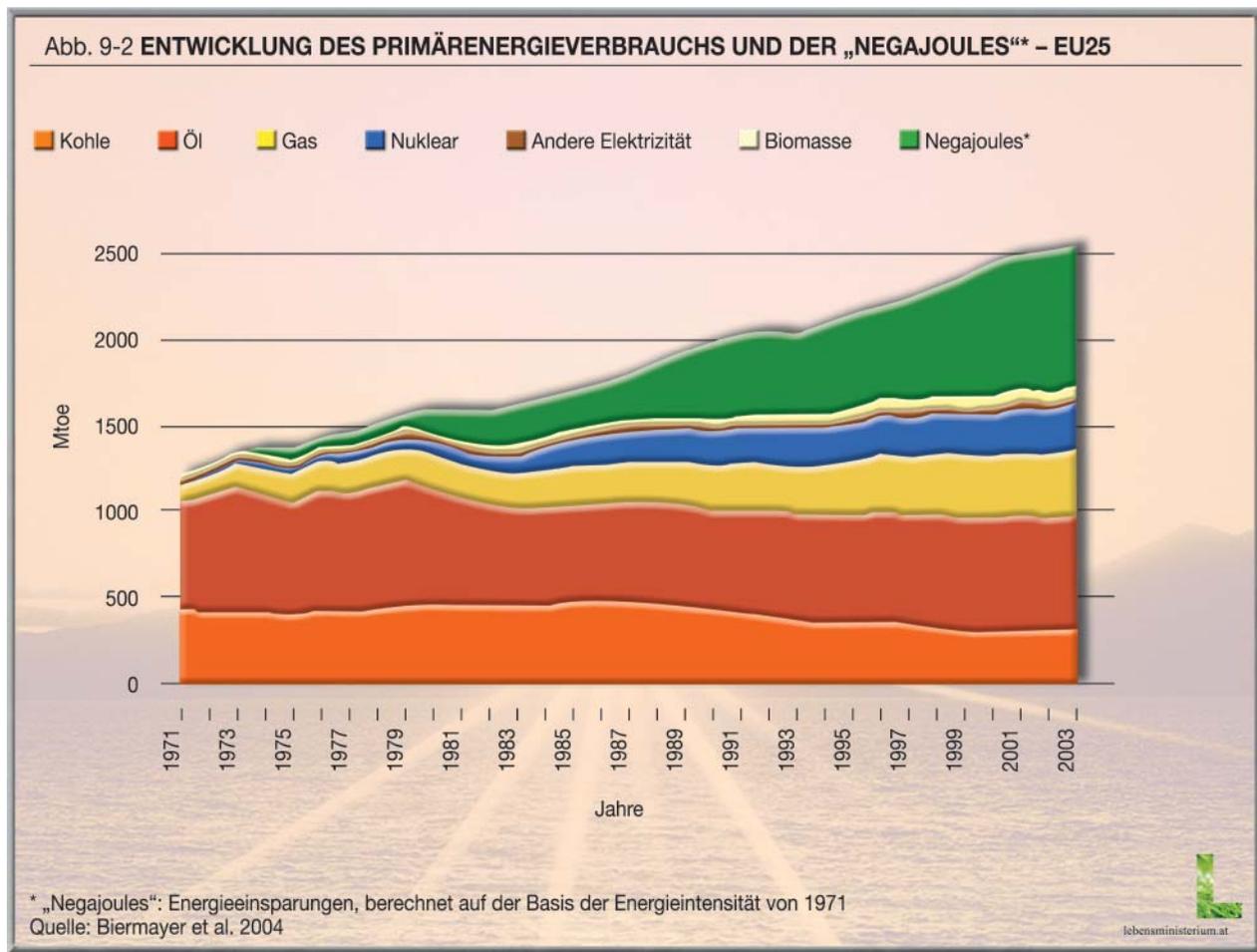
9.3 Dynamik des Energiebedarfs in der Europäischen Union

Bei der Betrachtung der Frage, welche Rolle die Kernenergie bei der Einhaltung des Kyoto - Ziels spielen kann, ist die Europäische Union von besonderem Interesse, da sie etwa 15 % der weltweiten Primärenergie verbraucht und mehr als ein Drittel ihres Stroms in Kernkraftwerken produziert. Der aktuelle Stromzuwachs der EU-25 liegt bei 1,3 % jährlich.

Die Europäische Kommission hält fest, dass das Energiesparpotential beträchtlich ist und mit der Verwendung existierender Maßnahmen und Technologien der EU-Energieverbrauch um 20 % bei gleichzeitiger Kostenersparnis von 60 Milliarden Euro jährlich reduziert werden könnte. [European Commission 2005]

Das Phänomen des Wirtschaftswachstums bei einem prinzipiell konstanten Energieverbrauch, bekannt als „Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Energieverbrauch“, wurde über mehrere Jahrzehnte bei der Industrie der EU verzeichnet, und galt auch für die gesamte Wirtschaft während der 70er und 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts. Allerdings handelte es sich dabei um ein vorübergehendes Phänomen, das durch die hohen Energiepreise und leider nicht durch eine Effizienzpolitik mit anhaltender Wirkung verursacht wurde. Zur Zeit wachsen Energiebedarf und BIP harmonisch mit etwa gleicher Rate als Ergebnis niedriger Energiepreise und dem Fehlen von Maßnahmen zur Lenkung der Marktkräfte angesichts der niedrigen Energiepreise. Die Auswirkungen des kürzlichen, beachtlichen Anziehens der Energiepreise bleiben abzuwarten.

Die untenstehende Abbildung 9-2 zeigt, dass (a) der Energieverbrauch nur um weniger als die Hälfte der Rate des BIP-Wachstums gestiegen ist, (b) dies in erster Linie der verringerten Energieintensität zu verdanken ist, und dies in Europa, wo von einem im Vergleich zu Entwicklungs- oder Schwellenländern bereits hohen Niveau an Energieintensität ausgegangen wurde. Der erhöhte Energieverbrauch wurde im wesentlichen von der Kernenergie beigesteuert. Zugleich ist eine Verschiebung des Brennstoffmixes zu Gunsten von Erdgas zu beobachten.



Der Beitrag von Energieeffizienz und Strukturwandel zum BIP-Wachstum betrug in den letzten drei Jahrzehnten in etwa das 2,4 fache des Beitrags der Kernenergie. Wenn sich die Energieintensität nur etwas stärker verringert hätte als sie sich tatsächlich verringert hat, so hätte das den Beitrag der Kernenergie „ersetzen“ können.

9.4 Kernkraftwerke: Eine relativ teure Maßnahme zur CO₂-Reduktion

Es wurden umfassende Untersuchungen über die Rolle der Kernenergie bei der CO₂-Reduktion durchgeführt. Die Kerntechnologie selbst produziert vergleichsweise geringe CO₂-Mengen im gesamten Brennstoffzyklus. Es gibt aber noch andere Technologien und Programme, die im Betrieb ebenso sehr geringe oder gar keine CO₂-Emissionen produzieren. Daher steht Regierungen oder Energieversorgern eine ganze Reihe von Möglichkeiten zur Reduktion der CO₂-Emissionen und zur Investition in verschiedene Technologien zur Verfügung.

Eine Reihe von Studien haben die Opportunitätskosten verschiedener Technologien verglichen und sind zu den folgenden Schlussfolgerungen gekommen:

Bill Keepin and Gregory Kats: Sie verglichen die wirtschaftlichen Kosten einer Investition in Kernenergie mit einer Investition in Energieeffizienzmaßnahmen und kamen zu folgendem Schluss: „Selbst wenn die optimistischsten Hoffnungen für die künftige Wirtschaftlichkeit (der Kernenergie)

gie) heute Realität werden würden, so würde Energieeffizienz noch immer 2,5 bis 10 mal mehr CO₂ pro Investitionseinheit ersetzen. Wir gelangen zu der Schlussfolgerung, dass eine Wiederbelebung der Kernenergie eine relativ teure und ineffektive Maßnahme gegen die globale Erwärmung darstellen würde und dass der Schlüssel zur Reduktion künftiger CO₂-Emissionen in der Verbesserung der Energieeffizienz der globalen Wirtschaft liegt.“ [Keepin and Kats 1988]

Florentin Krause: Eine vom International Project for Sustainable Energy Paths (IPSEP) [Krause 2000] veröffentlichte Studie zeigt, dass EU-weit das Kyoto-Ziel bei gleichzeitiger Erhöhung der Wirtschaftseffizienz und dem Ausschluss der Kernenergienutzung bis 2020 erreicht werden kann. Die Schlüsselergebnisse der Studie lauten:

- Unter der Annahme, dass Maßnahmen im Jahr 2000 anlaufen, die nur 50 % bis 65 % des europäischen Potentials zur Erhöhung der Effizienz und anderer CO₂-reduzierender Maßnahmen erzielen, wird es möglich sein, die Emissionen in der EU im Jahre 2010 auf 8 % unter das Niveau von 1990 zu verringern und somit das Kyoto-Ziel zu erreichen.
- Diese CO₂-Reduktionen können auch erreicht werden unter der Annahme eines beschleunigten Ausstieges aus der Kernenergie vor 2020 – gemäß dieser Studie hat Europa demnach eine technologische Wahl in der Umsetzung der globalen umweltpolitischen Ziele und muss nicht nukleare gegen klimatische Risiken eintauschen um das Kyoto-Ziel zu erreichen.
- Maßnahmen zur CO₂-Reduktion gehen normalerweise Hand in Hand mit einer Erhöhung der Produktivität und das bedeutet, dass Investitionen in den Klimaschutz nicht nur zu einer CO₂-Reduktion führen, sondern auch zu einer Erhöhung der wirtschaftlichen Produktivität.

Drei Studien aus 2006 unterstreichen auch die hohen Kosten der Benutzung von Kernenergie als Mechanismus zur Reduktion der CO₂-Emissionen.

Amory Lovins: „Eine Analyse des Rocky Mountains Institute in den USA schätzt, dass Kernenergie nur halb soviel Kohlenstoff pro Dollar einspart wie Windenergie und traditionelle Cogeneration, die Hälfte bis ein Neuntel von dem einspart, was innovative Cogeneration bringt, und sogar nur ein Zehntel der Kohlenstoffeinsparung pro Dollar von Endenergie-Effizienzmaßnahmen bewirkt.“ [Lovins 2006]¹

Uwe Fritsche: „Wenn wir optimistisch sind und einen Wert aus dem unteren Bereich der Schwankungsbreite nuklearer Treibhausgas-Reduktionskosten zum Vergleich mit den fossilen Alternativen (Cogeneration) und erneuerbarer Alternativen (Biomasse und Off-Shore Windenergie) wie auch Energieeffizienz heranziehen, zeigt sich, dass der alternative Mix 3 bis 4 mal niedrigere Treibhausgas-Reduktionskosten aufweist, als die der Kernenergie“. [OKO 2006]²

UK Sustainable Development Commission: „Kernenergie ist nicht die Antwort zur Lösung des Klimaproblems oder der Versorgungssicherheit.“ Als Antwort auf den kürzlich von der Regierung veröffentlichten Energie-Überblick stellt der SDC Nuklearbericht die umfassendste Beweis-

¹ Lovins 2006 „nuclear power saves as little as half as much carbon per dollar as windpower and traditional cogeneration, half to a ninth as much as innovative cogeneration, and a little as a tenth as much carbon per dollar as end-use efficiency“.

² OKO 2006 „If we are optimistic and use the low range of nuclear GHG abatement costs to compare with the fossil alternatives (cogeneration) and renewable energy (biomass and offshore wind) as well as some electricity efficiency, the alternative mix offers GHG abatement costs three to four times lower than that those of nuclear power“.

sammlung zusammen, um dann den Schluss zu ziehen, dass es keine Rechtfertigung gibt, gegenwärtig ein neues Nuklearprogramm zu betreiben. [SDC 2006]

9.5 Kernenergie in Schwellenländern

Bei der Nutzung von Energie besteht weltweit eine enorme Ungleichheit. Ein Mensch in einer Industrienation verbraucht etwa fünf Mal soviel Energie wie jemand in einem Entwicklungsland. Zur Zeit haben 2,4 Milliarden Menschen keinen Zugang zu modernen Energiedienstleistungen. [Canrea 2005]

Etwa 1,6 Millionen Todesfälle jährlich werden auf Kochen und Heizen mit festen Brennstoffen auf offenem Feuer und die daraus entstehende starke Belastung in den Wohnräumen zurückgeführt, vor allem bei Kindern unter fünf Jahren. Kochen und Heizen mit festen Brennstoffen gehören somit zu jenen Aktivitäten, auf welche die höchste Anzahl an Todesfällen zurückzuführen ist. [WHO 2005]

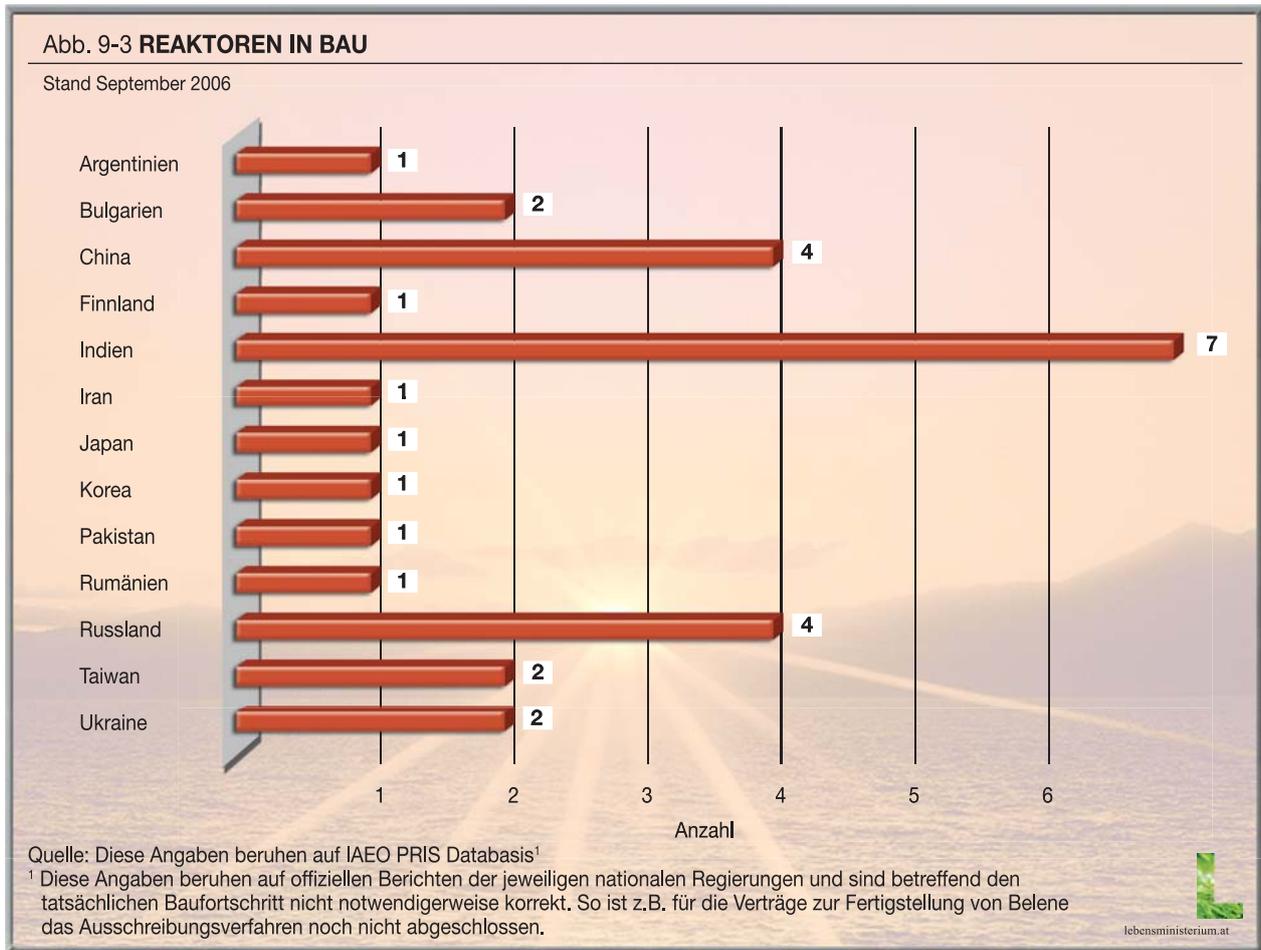
Eines der im Jahre 2000 von den Vereinten Nationen verabschiedeten Millenniums-Entwicklungszielen ist die Halbierung der Anzahl von Menschen, die mit weniger als einem Dollar pro Tag auskommen müssen, bis 2015. Es gibt einen deutlichen und unbestrittenen Zusammenhang zwischen dem Zugang zu Energiedienstleistungen und dem Erreichen dieses Zieles. Dennoch prognostiziert die Internationale Energieagentur (IEA) das Ansteigen der Anzahl von Menschen, die keinen Zugang zu modernen Energiedienstleistungen haben, auf 2,63 Milliarden bis 2030.

Die Zukunft des Energieverbrauchs wird wesentlich davon abhängen, was in den Entwicklungsländern und den Schwellenländern passiert, vor allem in China und Indien. Für diese Länder wird eine Verdoppelung oder Verdreifachung des Energieverbrauchs in den nächsten 30 Jahren erwartet. Ihr Anteil an der globalen Energienachfrage wird kurz nach der Jahrhundertwende den der OECD-Länder übertreffen und es wird prognostiziert, dass der Energiebedarfszuwachs fast ausschließlich mit fossilen Brennstoffen gedeckt werden wird.

Außerhalb Europas und Nordamerikas wird Kernenergie in 10 Ländern genutzt und spielt dort – abgesehen von Süd-Korea (38 %), Japan (23 %) und Taiwan (23 %) – nur eine kleine Rolle bei der Stromproduktion: Argentinien (8,2 %), Südafrika (6,6 %), Mexiko (5,2 %), Brasilien (3 %), Indien (2,8 %), Pakistan (2,4 %) und China (2,2 %). Das bedeutet, dass die Kernenergie weniger als 1 % der in diesen Regionen der Welt verbrauchten kommerziellen Energie beträgt, im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt von 6,2 %.

Ein eventueller Anstieg der Kernenergienutzung wird in Ländern außerhalb der OECD erwartet. Das spiegelt sich in der Tatsache wider, dass von den 28 Reaktoren, die in Bau sind, nur zwei in OECD-Ländern sind, nämlich in Finnland und Japan (Abbildung 9-3).

Im nächsten Jahrzehnt werden unvorstellbar hohe Investitionen für den chinesischen Energiesektor notwendig werden. Man geht davon aus, dass der Großteil in den Strombereich gehen wird, fast 2 Billionen \$ an Investitionen in den nächsten 30 Jahren. Gesamt sollen fast 500 GW an neuer Erzeugungskapazität errichtet werden, wovon ein Zehntel Kernenergie sein soll. Das würde den Kernenergieanteil an der Stromproduktion von rund 2 % auf rund 6 % erhöhen.



Angesichts dieser Tatsache kann Kernenergie nur dann eine wesentliche Rolle bei der Vermeidung von CO₂-Emissionen spielen, wenn sie für die Märkte in diesen Ländern geeignet ist, d.h. wenn die Kernenergie an die jeweiligen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und rechtlichen Strukturen und Sicherheitskulturen angepasst werden kann. Die aktuelle Generation von Kernkraftwerken erfüllt diese Anforderungen nicht: Die jetzige Kernenergietechnologie erfordert eine Sicherheitskultur, Infrastruktur und spezielle Ausbildung, die auch das Limit dessen darstellt, was die Industrienationen aufbringen können. Die Kernenergie kann daher nicht als an Schwellen- bzw. Entwicklungsländer angepasste Technologie betrachtet werden.

Es gibt verschiedene Punkte bei der für und in Industrienationen entwickelten Kernenergie, die den Bedürfnissen von Entwicklungsländern nicht entsprechen:

Inadäquate Dimensionierung: Die Wirtschaftlichkeit der Serienproduktion, d.h. die „wirtschaftliche“ Größe eines Reaktors der aktuellen Generation liegt bei einem GWe und darüber und ist zur Grundlastdeckung bestimmt, während der Bedarf bei adaptierbaren, der Lastkurve der Nachfrage folgenden Kraftwerken liegt.

Inkompatibilität mit der Infrastruktur: Wenn die Voraussetzung zur Realisierung der aktuellen Kernenergietechnologie die Modifizierung einer Gesellschaft ist – deren Industrie, Arbeitskräfte und Aufsichtsbehörden – um sie den Bedürfnissen der Kernenergie anzupassen, so kann dies wohl nicht als nachhaltig bezeichnet werden. Werden umgekehrt die Länder zu Verkäufern von Standorten für Kernkraftwerke degradiert, die dann von Firmen und Teams aus den hoch indu-

strialisierten Ländern betrieben würden, kann die Technologie nicht als „adaptierte Technologie“ bezeichnet werden und wäre nicht akzeptabel.

9.6 Ausweitung der Verwendung von Kernenergie

Weltweit wird Kernenergie in 32 Ländern betrieben, insgesamt gibt es 443 Reaktoren. Im Jahre 2004 lag der weltweite Kernenergiestromanteil bei 16 % und machte 6 % der globalen kommerziellen Energie aus. Wenn nicht-kommerzielle Energie einbezogen wird – z.B. die Verwendung von solarthermischer Energie und Biomasse (erzeugt für den Eigenverbrauch) – dann sinkt der Anteil der Kernenergie an der gesamten verbrauchten Energie noch weiter. In den letzten Jahrzehnten verlangsamte sich die Errichtung neuer Kernkraftwerke in der ganzen Welt deutlich und zur Zeit befinden sich weltweit nur 28 Reaktoren in Bau. Im Jahre 2005 wurde weltweit die Errichtung von nur zwei neuen Reaktoren begonnen, von Chasnupp 2 in Pakistan und von Olkiluoto 3 in Finnland.

Wenn man von einer Betriebszeit von 40 Jahren für moderne Reaktoren ausgeht, was relativ optimistisch ist, da zur Zeit ein Reaktor nach einem durchschnittlichen Betrieb von 22 Jahren stillgelegt wird, aber möglich ist wenn man den Fortschritt bei der aktuellen Reaktorengeneration im Vergleich zu den vorigen beachtet, dann müssten alleine zur Erhaltung des aktuellen Kernenergiestromanteils im globalen Mix innerhalb der nächsten 10 Jahre 82 Reaktoren in Betrieb gehen – innerhalb eines Jahrzehnts [Schneider 2004]. Das ist ohne eine rapide weltweite Renaissance der Kernenergie unmöglich. Angesichts der langen Vorlaufphasen für Kernkraftwerke (von der Bestellung des Reaktors bis zur Stromproduktion) ist das allerdings sehr unwahrscheinlich.

Die Kernenergie verwendet Uranbrennstoff, der genauso wie fossile Brennstoffe in seinem Vorkommen auf der Erde limitiert ist. Zur Zeit gibt es viele verschiedene Schätzungen über die globalen Uranreserven. Die Schätzungen sind abhängig von Abbautechnik, Abbaukosten und den aktuellen Brennstoffkosten. Sobald der Preis für den Brennstoff ansteigt, steigen tendentiell auch Erkundung und Abbau der Reserven an. Das World Energy Assessment (WEA) hat für verschiedene Brennstoffarten sowohl die zur Zeit bekannten Reserven zusammengestellt, als auch die Gesamtvorkommen abgeschätzt, ohne die Förderkosten einzubeziehen. Diese Zahlen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorkommen an fossilen Brennstoffen bei einem Verbrauchsniveau von 1998 für die nächsten 80 - 229 Jahre ausreichen werden, im Vergleich zu den Uranvorkommen mit nur 47 Jahren.

Tab. 9-1 **PROGNOSTIZIERTE ENERGIERESERVEN UND VORKOMMEN**

	Verbrauch 1998 (Tausend Exajoules)	Reserven (Tausend Exajoules)	Reichweite der Reserven (in Jahren)	Gesamtvorkommen (Tausend Exajoules)	Reichweite der Vorkommen (in Jahren)
Öl	0,14	11,11	80	21,31	152
Gas	0,08	14,88	186	34,93	436
Kohle	0,09	20,67	229	179,00	1988
Uran	0,04	1,89	47	3,52	88

Quelle: WEA 2004

lebensministerium.at

Andere Quellen führen etwas andere Zahlen an, vor allem für die Gesamtvorkommen. Die als „Red Book“ bekannte Schätzung (erstellt von der Internationalen Atomenergie Orga-

nisation IAEO und der Nuclear Energy Agency NEA) spricht davon, dass die Reserven bei einem Förderpreis von unter 80 \$/kg (etwa doppelt so hoch wie der gegenwärtige Preis) bei rund 3,5 Millionen liegt, und das Gesamtvorkommen bei etwa 9,7 Millionen Tonnen³. Sie gibt den jährlichen Uranverbrauch im Jahre 2003 mit 68.815 t an, daher würden die Reserven noch etwa 50 Jahre ausreichen, die Gesamtvorkommen etwa 140 Jahre. [IAEA/NEA 2003]

Sollte die weltweite Kernenergienutzung ausgeweitet werden, so wird sich die Rate erhöhen, mit der die Uranvorkommen der Welt verbraucht werden, und die Reichweiten fallen kürzer aus (siehe dazu auch Sholly, „Nuklear erzeugter Wasserstoff – eine nachhaltige Option?“, in dieser Publikation).

Um Erze mit geringerem Urangehalt aufzubereiten, bedarf es eines Energieeinsatzes, der selbst CO₂-Emissionen erzeugt. Die Verwendung der jetzigen Uranerze – mit etwa 2 % Konzentration – führt zum Ausstoß von etwa 33g CO₂-Äquivalent/kWh Kernenergiestrom in Deutschland. Andere in einer Studie des Ökoinstituts [ÖKO 2006] zitierte Schätzungen sprechen von einem internationalen Standard in der Bandbreite von 30-60 g CO₂/kWh. Die Betreiber in der World Nuclear Association (WNA) hingegen vertreten die Ansicht, dass dieser Wert niedriger läge, nämlich 6 – 26 g CO₂/kWh [WNA 2005]. Das Ökoinstitut nennt auch geschätzte Emissionen aus der Verwendung von Erzen mit niedrigerer Konzentration (0,1 - 1 % Konzentration): Die Werte können bis zu 120g/kWh ansteigen. Diese Treibhausgasemissionen sind mit den effektivsten KWK-Gasturbinen gleichauf. [ÖKO 2006]

Wenn die Kernenergie eine größere Rolle bei der Deckung des weltweiten Energiebedarfs spielen soll, so wäre eine massive Ausweitung der aktuellen Programme notwendig. Die Kernenergie produziert zur Zeit etwa 6 % der kommerziellen Primärenergie und 16 % der verbrauchten Elektrizität. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) präsentierte ein Szenario, bei dem die Kernenergie eine bedeutendere Rolle bei der Reduktion der CO₂-Emissionen spielt und auf 3000 GW installierte Kapazität im Jahre 2075 (das wären 50 % der weltweiten Stromproduktion) und anschließend auf 6500 GW im Jahre 2100 (75 % der Stromproduktion) ausgebaut wird. Bei diesem Szenario käme es zu einer Reduktion der für 2100 prognostizierten CO₂-Emissionen um ein Viertel. Selbst bei einer angenommenen Betriebsdauer von etwa 50 Jahren (ein Kompromiss zwischen der aktuellen und der angegebenen zukünftigen Betriebsdauer von Reaktoren und zweifellos sehr optimistisch) müsste die Errichtung von rund 7000 Reaktoren im nächsten Jahrhundert bzw. von 70 Reaktoren pro Jahr bewerkstelligt werden. Wenn man das mit dem bisherigen weltweiten Höhepunkt der Kernindustrie in den 1980er vergleicht, als die höchste Anzahl an Reaktoren an das Netz ging, nämlich 33, und da es im Jahre 2005 nur 5 waren, so ist dieses Szenario ein für die Nuklearindustrie sehr optimistisches. Wenn nur mit Uranbrennstoff betriebene Reaktoren verwendet würden, dann würden jährlich 600 t Plutonium anfallen. Wenn mit Plutonium betriebene Reaktoren zum Einsatz kämen, was angesichts der aktuellen Uranreserven und den favorisierten Reaktoren der Generation IV wahrscheinlich ist, so würden rund 4000 t Plutonium jährlich erzeugt werden. [Feiverson 2003]

Die Verwendung von Plutoniumbrennstoff in Reaktoren hat den Vorteil, dass die potentielle aus dem Uran verwendbare Energie um das Sechzigfache erhöht wird, was die Lebensdauer der Uranvorräte massiv verlängern würde. Die Erfahrungen mit dem Betrieb der Schnellen Brüter, die mit Plutonium betrieben wurden, waren kein Erfolg. In Europa wurden alle geplanten oder betriebenen Reaktoren in Frankreich, Deutschland und Großbritannien bereits stillgelegt, es gibt

³ Wenn der Uranpreis steigt, so wird auch weniger ökonomisch abbaubares Uran, bzw. Uranerz mit geringerem Urangehalt abgebaut.

jetzt nur mehr einen Forschungsreaktor – den Phenix in Frankreich. Weltweit gibt es nur mehr in Japan und Russland solche Reaktoren in Betrieb und einen in Bau, in Indien.

Abgebrannter Brennstoff aus konventionellen Reaktoren wird teilweise aufbereitet, wobei Plutonium abgetrennt wird um daraus Brennstoff herstellen zu können. In den 1970er und 1980er wurden Wiederaufbereitungsanlagen bestellt und in Frankreich und Großbritannien errichtet. Die Wiederaufbereitung ist ein technisch komplexer Prozess, bei dem wesentlich mehr Abfall entsteht, als der abgebrannte Brennstoff zunächst war. Die Zahlenangaben weisen eine beträchtliche Schwankungsbreite auf, zwischen etwa der 20-fachen bis zur 180-fachen Abfallmenge. Der Misserfolg mit der Brütertechnologie hat zu Vorräten von 200 t an abgetrenntem Plutonium geführt.

Eine Wiederbelebung des Plutoniumbrennstoff-Kreislaufs, selbst wenn dieser technisch und ökonomisch machbar werden sollte, erhöht das Proliferations-Risiko der friedlichen Kernenergienutzung: Bereits eine relativ geringe Menge an Plutonium, etwa 5 kg, reichen für die Herstellung einer Atombombe.

9.7 **Schlussfolgerungen**

Es bedarf einer globalen Anstrengung, um den CO₂-Ausstoß zu reduzieren und damit die Auswirkungen des Klimawandels zu vermindern. Weltweit ist es notwendig, sichere und nachhaltige Technologien zu verwenden, die in großem Umfang eingesetzt werden können.

Dieses Papier weist nach, dass die einzige realistische Möglichkeit, den CO₂-Ausstoß deutlich zu vermindern, die Reduktion der Energieintensität darstellt, d.h. die Erhöhung der Effizienz bei der Energieumwandlung und bei der Verwendung der Energie, die zur Deckung des steigenden Bedarfs nach Waren und Dienstleistungen aufgewendet wird.

Zur Verhinderung von CO₂-Emissionen auf die Kernenergie zu setzen, könnte bedeuten, dass das wesentlich größere Potential der Energieeffizienz-Erhöhung in den heutigen Wirtschaftssystemen ungenutzt bleibt, und zwar in noch größerem Maße, als in der Vergangenheit. Außerdem machen die beschränkten Uranvorkommen die breitere Verwendung von Kernenergie noch weniger sinnvoll, da das einzige längerfristig mögliche Nuklearprogramm auf Plutonium-Reaktoren setzen müsste, die den Abfall und die Proliferations-Risiken der Kernenergie stark erhöhen.

Um Effizienz zum „Marktführer“ zu machen, wären Strategien für höhere Energiepreise notwendig, aber noch nicht ausreichend. Die Gründe für den Rückgang der Energieintensität der letzten Jahrzehnte müssen sorgfältig analysiert werden: Welcher Anteil ist technologiebedingt, was ist auf politische Maßnahmen zurückzuführen? Transaktionskosten, rechtliche, gesellschaftliche und technische Barrieren müssen identifiziert und mit geeigneten Strategien überwunden werden, die in vielen Fällen erst entwickelt werden müssen. Erfahrungen (positive und negative) mit Faktoren, die für die Energieintensitätsreduktion förderlich oder hinderlich waren, sind sorgfältig zu analysieren. Man kann annehmen, dass die Reduktion der Energieintensität schwieriger zu organisieren ist, als eine neue Kernenergieinitiative zu lancieren, aber sicherlich geeigneter, um das Klimaproblem zu lösen (statt das Problem der stagnierenden Nuklearindustrie zu lösen).

9.8 Zusammenfassung

Dieses Papier kommt zu dem Schluss, dass die Kernenergie keine geeignete Option zur CO₂-Reduktion ist. Die wesentlichen Argumente gegen die Option Kernenergie sind:

Wenn Kernenergie nicht nur eine marginale Rolle bei der Reduktion von CO₂-Emissionen spielen soll, so müsste die Verwendung auf ein Niveau ansteigen, das einen wesentlichen Teil des prognostizierten Anstiegs beim Verbrauch von fossilen Brennstoffen ersetzen würde. Dazu müssten Kernkraftwerke mit einer Geschwindigkeit in Betrieb genommen werden, die noch eine Größenordnung über der Rate läge, die in den „goldenen Zeiten“ der Kernenergie erreicht wurde, d. h. in den 1970er und 1980er Jahren. Es gibt keine Grundlage für so eine Entwicklung, weder bei der Produktionskapazität noch bei der Fähigkeit der Länder, ein solches Wachstum zu absorbieren.

In den vergangenen Jahrzehnten wäre der Anstieg der weltweiten CO₂-Emissionen etwa doppelt so hoch gewesen wie er tatsächlich war, das heißt etwa doppelt so viel zusätzliche fossile Energie wäre verbraucht worden, wenn das Wirtschaftswachstum nicht mit einer deutlichen Reduktion der Energieintensität einhergegangen wäre. Im Vergleich dazu haben sämtliche Energiequellen mit geringem CO₂-Ausstoß, darunter auch die Kernenergie, einen wesentlich geringeren Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen geleistet. Das bedeutet, dass der Beitrag der Kernenergie und der erneuerbaren Energien von der Effizienzverbesserung und von Strukturänderungen bei der Energieumwandlung und Energieverwendung bei weitem übertroffen wurde.

Die Reduktionsrate der weltweiten Energieintensität ist steuerbar (in der Vergangenheit lag sie etwa bei 1 % jährlich). Wäre diese Rate höher gewesen, zum Beispiel bei 1,2 % statt 1 %, dann hätte diese zusätzliche „Produktion von Negajoules“ der erzeugten Kernenergie entsprochen. Eine Verdopplung der Rate (2 % statt 1 %) hätte, grob geschätzt, eine weltweite Entkoppelung des Wirtschaftswachstums vom Energieverbrauch bewirkt. Das bedeutet, dass Wirtschaftswachstum ohne steigenden Energieverbrauch möglich ist. Durch Vorgabe geeigneter Rahmenbedingungen, wie etwa Mindesteffizienzstandards für Gebäude oder Geräte, wäre das machbar.

Die steigende Energienachfrage entsteht nicht mehr vor allem in den Industrieländern, sondern mehr und mehr in den Entwicklungsländern und Schwellenländern, vor allem China und Indien. Angesichts dieser Tatsache kann Kernenergie nur dann eine wesentliche Rolle bei der Vermeidung von CO₂-Emissionen spielen, wenn sie für die Märkte in diesen Ländern geeignet ist, d.h., wenn die Kernenergie an die jeweiligen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und rechtlichen Strukturen und Sicherheitskulturen angepasst werden kann. Die aktuelle Generation von Kernkraftwerken erfüllt diese Anforderung nicht. Man könnte nun argumentieren, dass die Atomtechnologie diesen Anforderungen angepasst werden sollte. Doch gibt es keine Entwicklung, die darauf hindeuten würde, dass die Kernenergie in Entwicklungsländern und Schwellenländern in einem solchen Umfang angewendet werden könnte oder sollte, dass dies ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz wäre.

Ein weltweiter Anstieg der Verwendung von Kernenergie als Technologie zur Reduktion von CO₂-Emissionen würde weitere Umwelt- und Sicherheitsprobleme bringen. Der Mangel an Uranerz mit hoher Konzentration würde den Einsatz von Plutoniumreaktoren erfordern, was die bereits bei den heutigen, relativ eingeschränkten Kernenergieprogrammen auftretenden Probleme mit nuklearem Müll und Proliferation noch verschärfen würde.

9.9 Literatur

Biermayr Peter, Heindler Manfred, Haas Reinhard und Sebesta Brigitte (2004): Nuclear Energy and Kyoto Protocol in Perspective, unveröffentlicht, November 2004

BP (2005): Beyond Petroleum Statistical Review of World Energy, June 2005

Canrea (2005): Renewable Solutions. Options for moving the global transition to renewable energy forward. Canadian Renewable Energy Alliance, December 2005

European Commission (2003): Annual Energy Review, Energy in Europe, Special Issue January 2000, European Commission; see also European Union Energy Outlook to 2000, Energy in Europe, Special Issue, November 1999

European Commission (2005): 20 % Energy Saving by 2020. Memo based on Green Paper on Energy Efficiency, European Commission, June 2005

Feiverson (2003): Nuclear Power, Nuclear Proliferation and Global Warming, H.A. Feiverson, Forum on Physics and Society of the American Physical Society, January 2003

IAEA/NEA (2003): Uranium 2003 resources, production and demand. International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Agency, 2003

IEA (2003): World Energy Investment Outlook 2003. Internationale Energieagentur, 2003

IEA (2004): World Energy Outlook, Internationale Energieagentur, 2004

IEA (2005): World Energy Outlook 2005, Middle East and North America Insight, Internationale Energieagentur, November 2005

Keepin and Kats (1988): Greenhouse warming; Comparative Analysis of Nuclear and Efficiency Abatement Strategies. Bill Keepin and Gregory Kats, Energy Policy, December 1988

Krause (2000): F. Krause, J. Koomey, D. Olivier (2000): Cutting Carbon Emissions While Making Money, California 2000

Lovins (2006): Nuclear power: Economics and climate-protection potential. Amory B. Lovins CEO, Rocky Mountain Institute, January 2006

ÖKO (2006): Comparison of Greenhouse Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective – updated Version. Uwe R Fritsche, Susi-San Lim, January 2006

Schneider (2004): The World Nuclear Industry Status Report 2004, Mycle Schneider and Antony Froggatt, Green-EFA Group in European Parliament, December 2004

SDC (2006): Nuclear Power Won't Fix It: Press Release for „The role of Nuclear Power in a Low Carbon Economy.“ Sustainable Development Commission, March 2006
<http://www.sd-commission.org.uk/pages/060306.html>

WEA (2004): World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability, Chapter 5, Energy Resources, 2004 update

WHO (2005): Multiple links between household energy and the Millennium Development Goals, World Health Organisation
<http://www.who.int/indoorair/mdg/energymdg/en/>

WNA (2005): Energy Balances and CO₂ Implications. World Nuclear Association, November 2005
<http://www.world-nuclear.org/info/inf100.htm>

10 Nukleare Energie – Die wirtschaftliche Frage

Antony Froggatt

Februar 2006, geringfügige Aktualisierungen September 2006

Inhaltsverzeichnis

10	Nukleare Energie – Die wirtschaftliche Frage	218
10.1	Einleitung	218
10.2	Sind die Annahmen, die den Kostenberechnungen für neue Nuklearanlagen zugrunde liegen, zu rechtfertigen?	219
10.3	Was sind die finanziellen Risiken die mit einem Neubau Programm verbunden sind?	220
10.4	Werden neue nukleare Kraftwerke zusätzliche staatliche Unterstützung erfordern oder Zuschüsse brauchen um im liberalisierten Markt zu konkurrieren?	223
10.5	Darf man die vollen Umweltkosten verschiedener Energieoptionen außer Acht lassen?	225
10.6	Werden die Kosten der Kernenergie sinken?	227
10.7	Schlussfolgerungen	229
10.8	Literatur	231

10 Nukleare Energie – Die wirtschaftliche Frage

10.1 Einleitung

Energiepolitik stützt sich in den meisten Fällen – und das trifft auch für die EU zu – auf drei Säulen: Nachhaltigkeit, Sicherheit der Versorgung und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit. Während der letzten Dekaden, besonders seit der Liberalisierung des Energiemarktes, lag das Hauptaugenmerk der Kernenergie auf ihrer Wirtschaftlichkeit. Bis vor kurzem war es weitgehend akzeptiert, dass Kernenergie teurer war als die üblichen Alternativen. Dies war einerseits auf die höhere Kostentransparenz in Verbindung mit der Einführung des liberalisierten Marktes zurück zu führen und andererseits auf die – im Vergleich mit Gas- und Kohlekraftwerken – signifikant höheren Baukosten und auch auf die – im Vergleich zu heute – niedrigeren Brennstoffkosten für Öl und Gas. Beobachter der Nuklearindustrie beschrieben die Situation wie folgt: „Eine Deregulierung der Europäischen Märkte könnte eine größere Bedrohung für die Zukunft der Kernenergie darstellen als Anti - Nuklear Ideologien“. [NUKEM 1997]

Eine Analyse, die von der Nuclear Energy Agency (NEA) 1998 veröffentlicht wurde, zeigt, dass in praktisch allen OECD-Ländern Elektrizität, die aus Kernkraftwerken gewonnen wurde, teurer war, als die aus konventionellen Wärmekraftwerken (Gas und Öl). In nur drei Ländern (Frankreich, Japan, Russland) war die Kernenergie billiger als die Energie, die in mit Kohle oder Öl befeuerten Kraftwerken gewonnen wurde – dies wenn man eine 10 % Abzinsungsrate ansetzt (das ist der Zinssatz, der für die Bauzeit angesetzt wird – ein Schlüsselfaktor für die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie). Im globalen Schnitt ist die Kernenergie um 15 % teurer als durch Gas und um 6 % teurer als durch Kohle generierte Energie. [IEA/NEA 1998]

Die gegenwärtigen hohen Treibstoffkosten der primären Alternative – Gas – veranlassen Einige zu behaupten, dass Kernenergie nun vergleichsweise billiger sei als die gängigen Alternativen. Insbesondere folgerte die NEA in ihrer überarbeiteten Vorhersage im Jahr 2005, dass sich bei einer 10-prozentigen Abzinsungsrate¹ die Kosten für Strom aus Kohle auf \$ 35-60/MWh, aus Erdgas auf \$ 40-63/MWh und aus Kernenergie auf \$ 30-50/MWh belaufen [IEA/NEA 2005].

Viele andere wirtschaftliche Berichte und Indikatoren unterstützen die Schlussfolgerungen des letzten NEA Berichts nicht vollständig und zeigen einige Aspekte auf, welche die wirtschaftliche Attraktivität der Kernenergie beeinflussen werden. Dieser Bericht wird einen kurzen Blick auf diese Aspekte werfen.

- Sind die Annahmen, die den Kostenberechnungen für neue Nuklearanlagen zugrunde liegen, zu rechtfertigen?
- Welche finanziellen Risiken sind mit dem Neuerrichtungsprogramm verbunden?
- Brauchen neue Kernkraftwerke zusätzliche staatliche Unterstützung oder Zuschüsse um im liberalisierten Markt konkurrenzfähig zu sein?

¹ Die Wahl der Abzinsungsrate beeinflusst das Ergebnis derartiger Berechnungen wesentlich.

- Darf man die vollen Umweltkosten verschiedener Energieoptionen außer Acht lassen?
- Wie hoch sind die Kosten der Kernenergie im Vergleich zu anderen Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen?

10.2 Sind die Annahmen, die den Kostenberechnungen für neue Nuklearanlagen zugrunde liegen, zu rechtfertigen?

In den letzten Jahren wurden zahlreiche wirtschaftliche Analysen vorgenommen, um die vorhergesagten Kosten für die Errichtung weiterer Kernkraftwerke zu beurteilen. Tabelle 10-2, am Schluss des Abschnittes, gibt Details zu einigen dieser Studien und stellt einen Vergleich an. Sie zeigt die Hauptparameter, welche die Elektrizitätskosten von Kernkraftwerken beeinflussen.

Bauzeiten:

Die Nuklearindustrie weist historisch, wie dies auch bei anderen großen Bauprojekten der Fall ist, keinen guten Ruf hinsichtlich zeitgerechter Baufertigstellung auf. Die Berichte, die hinsichtlich der Bauzeiten durchgesehen wurden, schätzen, dass die Bauzeit auf 5 Jahre (60 Monate) und damit beträchtlich reduziert werden kann. Im Gegensatz dazu weisen die Daten der Länder mit den zwei größten Kernkraftwerksprogrammen (Tabelle 10-1) darauf hin, dass diese optimistische Einschätzung für neue Bauten nur schwer einzuhalten sein wird.

Die aktuelle Erfahrung gibt es in Finnland, wo das einzige derzeit in der Europäischen Union in Bau befindliche Kernkraftwerk in Olkiluoto erreichtet wird: nach weniger als 2 Jahren Bauzeit geht man davon aus, dass man mit dem Vorhaben etwa 1 Jahr in Verzug ist.

Tab. 10-1 **MONATE VON BAUSTART BIS ZU WIRTSCHAFTLICHEM BETRIEB**

Stand 31.12.01

	Durchschnitt (Monate)	Minimum	Maximum	Standard Abweichung	Letzter Baubeginn
US KKW am Netz	111	40	280	44	1977
Frankreich KKM am Netz	79	51	195	24	1985

Quelle: IAEA 2002

lebensministerium.at

Baukosten:

Die Vorhersagen für die Baukosten zeigen eine große Variation auf, sie gehen von € 810 bis € 3.650/ installiertem kW aus. Eine noch größere Variation wird sichtbar, wenn man die theoretischen Kosten mit den tatsächlichen vergleicht. Weil nur wenige Reaktoren in den letzten Jahren gebaut wurden, gibt es nur wenige Vergleichsmöglichkeiten für tatsächliche Baukosten. Der letzte im Vereinigten Königreich fertig gestellte Reaktor war Sizewell B in den 1990ern und es wird allgemein geschätzt, dass die Kosten der Fertigstellung circa € 5.110/kW betragen. Bei Japan General Electrics schätzte man, dass der neue, fortgeschrittene 1300 MW Siedewasserreaktor mit Kosten von circa \$ 1.528/kW gebaut werden kann. Als jedoch die Einheiten für Tokyo Elec-

tric Power Company errichtet wurden, betrug die tatsächlichen Baukosten \$ 3.236/kW für die erste und \$ 2.800/kW für die zweite Einheit.

Kapitalkosten:

Die Kosten der Kredite sind eine der wichtigsten Variablen, weil aufgrund der großen Baukosten schon kleine Änderungen bei der Verzinsung große Auswirkungen auf den Strompreis haben können. Die betrachteten Studien zeigen eine Variation von 5-12 % Abzinsung in ihrer Analyse. Die Kapitalkosten werden von den mit dem Projekt verbundenen Risiken beeinflusst.

Lastfaktor:

Über die letzten Jahre hat sich der durchschnittliche Lastfaktor von Reaktoren erhöht. Dies ist zum einen das Resultat der Versuche der Operatoren, Ausfälle zu vermindern – um den Profit zu erhöhen – und zum Teil auch das Resultat des Durchschnittsalters der Reaktoren. Betrachtet man die Lebenszeit eines Reaktors beginnt der Lastfaktor mit niedrigen Werten – Kinderkrankheiten – dann sollte eine gute Periode folgen, in welcher der Reaktor einen effizienten Betrieb aufweist, bevor dann Alterungsprobleme einsetzen – was bereits mit etwa 20 Jahren beginnen kann und sich ab 30 bis 40 Jahren zunehmend verstärkt. Das globale Durchschnittsalter aller Reaktoren beträgt circa 22 Jahre und liegt daher im Großen und Ganzen in der optimalen Altersspanne. Trotzdem liegt der durchschnittliche Lastfaktor nur bei 77,8 %. Die Abschätzungen für Lastfaktoren von 85 % über die gesamte Lebenszeit werden von einigen als optimistisch eingeschätzt.

Arbeitszeit:

Wie bereits erwähnt weisen die heutigen Reaktoren eine durchschnittliche Betriebsdauer von 22 Jahren auf, während die durchschnittliche Betriebsdauer von stillgelegten Reaktoren ebenfalls 22 Jahre beträgt. Im Moment werden aber in einigen Ländern – wie zum Beispiel den USA – Pläne umgesetzt, die Betriebsdauer existierender Reaktoren auf 60 Jahre auszudehnen. Folglich schlagen einige wirtschaftliche Analysen, die im Moment vorgenommen werden vor, dass die wirtschaftliche Lebensdauer eines Reaktors mit 40 Jahren oder mehr angesetzt werden sollte. Dies scheint optimistisch, zieht man das Fehlen technischer und wirtschaftlicher Erfahrung hinsichtlich des Betriebs von Leichtwasser Reaktoren über 40 Jahre hinaus in Betracht.

10.3 Was sind die finanziellen Risiken die mit einem Neubau Programm verbunden sind?

Die Unsicherheiten bezüglich der Rentabilität von Kernkraftwerken haben in der Finanzwelt Bedenken erzeugt, in die Kernenergie zu investieren; im Besonderen hat man erkannt, dass Öl- und Gaspreise unbeständig sind und daher auch wieder sinken können. Kernkraft hat hohe Fixkosten – für Bau und Dekommissionierung – und lange Bauzeiten. Im Durchschnitt liegen die Errichtungskosten pro installiertem kW für ein Kernkraftwerk ungefähr beim zweifachen eines Kohlekraftwerks und beim vierfachen eines Gaskraftwerks. Darüber hinaus braucht es 5 - 10 Jahre um ein Kernkraftwerk zu errichten, während ein Gaskraftwerk in 3 Jahren gebaut ist und ein Windpark in 6 Monaten. Das heißt, dass es vom finanziellen Standpunkt betrachtet höhere vorzufinanzierende Kosten gibt, es aber auch länger dauert, bis die ersten Einkünfte erzielt werden können. Das ist neben den vorhergesagten Gesamtbetriebszeiten – nun 40 - 60 Jahre – der

Grund warum Investitionen in Kernkraftwerke von der Consultingfirma UBS als „eine potentiell mutige 60-Jahres Wette auf Benzinpreise, Diskontraten und versprochene Effizienzerträge...“ bezeichnet wurden [UBS 2005].

Tab. 10-2 ERZEUGUNGSKOSTEN VON KERNKRAFTWERKEN

VorhersageQuelle	Baukosten (€/kW)	Bauzeit (Monate)	Kapitalkosten (% real)	Lastfaktor (%)	Betriebsdauer (Jahre)	Erzeugungskosten (€/kWh)
Canadian Nuclear Ass. ¹	1.557	72	10	90	30	4,82
Chicago University ²	810	84	12,5	85	40	4,23
	1.216					4,96
	1.460					5,69
IEA/NEA ³	1.606-3.650	60-120	5	85	40	1,75-3,94
Lappeenranta Univ ⁴	1.748		10	91	40	2,6-5,5
OXERA ⁵	2.372 Erstes KW		5			2,23
	1.679 Folgeprojekt			95	40	
Massachusetts Institute of Technology ⁶	1.622	60	11,5	85	40	5,4
			8	75	25	6,4
Performance & Innovation Unit ⁷	<1.226	-	8	>80	15	3,37
			8		15	4,13
			15		15	5,53
UBS ⁸	2.044	60		91	45	3,06
EPR ⁹	2.031	60	8	90,3	60	3,00

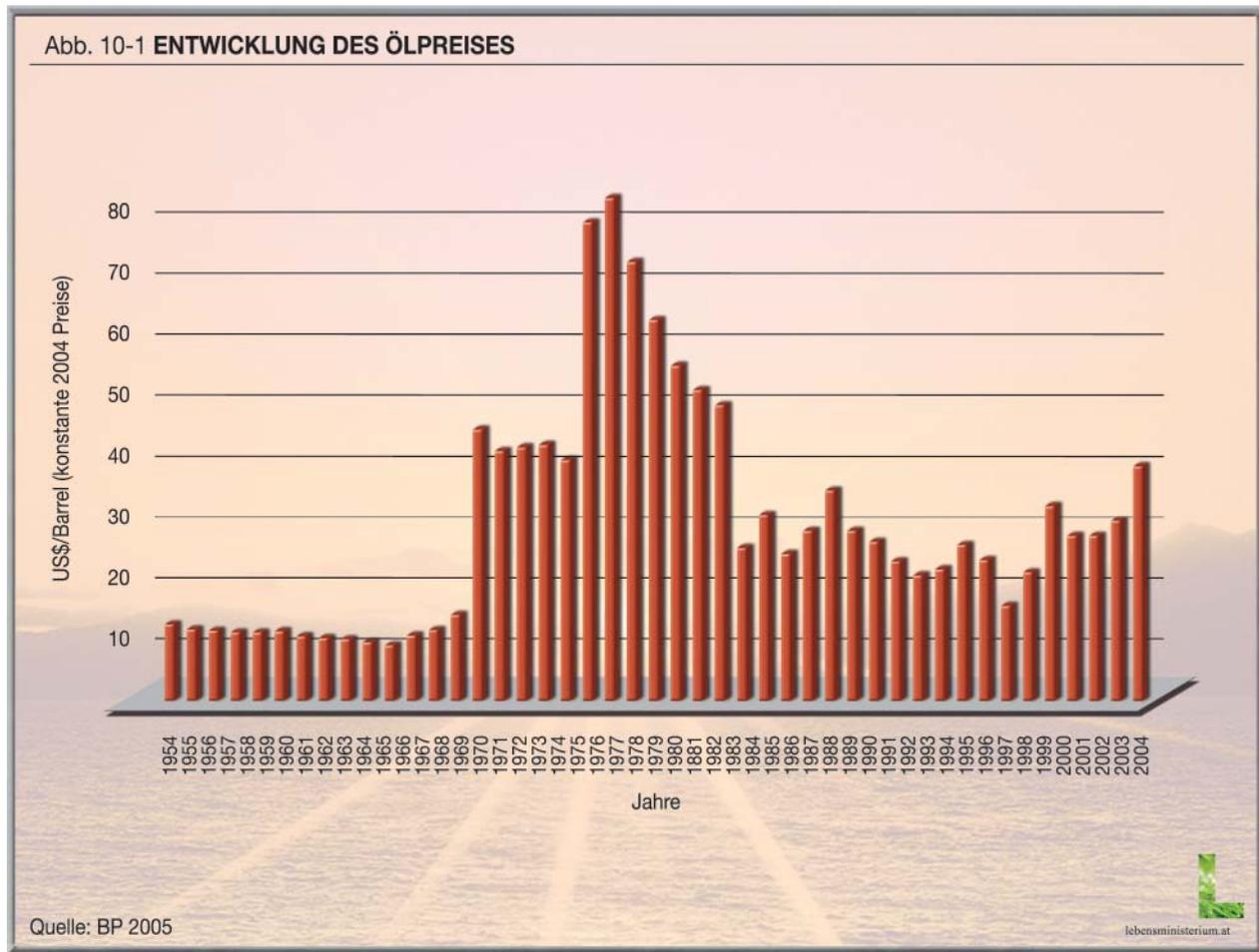
¹ Canadian Energy Research Institute, August 2004, Levelised Unit Electricity Cost Comparison, Ontario
² University of Chicago, August 2004, The Economic Future of Nuclear Power
³ OECD/ IEA NEA 2005, Projected Costs of Generating Electricity- update, 2005
⁴ Nuclear Power: Least- Cost Option for Baseload Electricity in Finland and RistoTarjanne & Sauli Rissanen, Uranium Institute, 2000.
⁵ Financing the nuclear option: modelling the costs of new build, Oxera Agenda, August 2005
⁶ "The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT study" (The MIT O&M cost includes fuel.) available at <http://www.mit.edu/afs/athena/org/n/nuclearpower/>
⁷ The Energy Review, Performance and Innovation Unit, February 2002
⁸ "More a question of politics than economics", Q Series: The Future of Nuclear, UBS Investment Research, March 2005
⁹ EPR Background and its Role in Continental Europe, Didier Beutier, Areva, Westminster Energy Forum, 23rd June 2005

lebensministerium.at

Der Bericht zeigt auch auf, dass der Ölpreis über \$ 28/barrel liegen muss damit Kernenergie wettbewerbsfähig sein kann – was er derzeit auch ist. Wie aber die Graphik unterhalb zeigt, war dies in den letzten 50 Jahren nicht immer der Fall, da diese Bedingung nur in weniger als 40 % der Zeit zugetroffen hat. Sinkende Ölreserven und steigende Nachfrage werden künftig jedoch eher zu höheren Ölpreisen führen.

Ein anderer Bericht der HSBC streicht ebenfalls die Risiken heraus, die mit Investitionen in neue Kernkraftwerke zusammenhängen [HSBC 2005]: „Daher könnte dieses finanzielle Risiko [neue Kernkraftwerke] kombiniert mit unerwarteten Bauverzögerungen, das Risiko aufwändiger politischer und administrativer Aufsicht, nukleare Abfallprobleme und Widerstand der Öffentlichkeit neue Kernenergie zu einer schwer zu schluckenden Pille für Equity Investoren² machen.“

² Equity Investoren – Kapitalgeber, die einem Unternehmen finanzielle Mittel auf Zeit zur Verfügung stellen und im Gegenzug Anteile oder Aktien übernehmen.



Andere finanzielle Institutionen weisen auf die hohen Risiken einer Investition in die Kernenergie hin, und betrachten andere Bereiche, welche die Investitionssicherheit dieser Technologie beeinflussen. Besonders Standard&Poor zeigen die Probleme eines nuklearen Unfalls, der Lagerung von nuklearem Abfall und die Probleme bei der öffentlichen Akzeptanz als Schlüsselfaktoren auf.

„Die Entwicklung von neuen Kernreaktor-Generationen ist im de-regulierten Europäischen Markt, wenn auch die langen Bauzeiten und Kapitalkosten mit einbezogen werden, ein höchst riskantes Unternehmen. Probleme bei der Standortwahl sind heute sicher noch viel größer als in den 1970er und 1980er Jahren, als die meisten Reaktoren gebaut wurden. Außerdem wird auch die politische Unterstützung trügerisch bleiben – abhängig von der Entwicklung der weltweiten Sicherheitsperformance der Nuklearanlagen. Ein anderer Tschernobyl-ähnlicher Unfall könnte die momentan leicht wohlwollende Einstellung schnell wieder relativieren. Grundlegende Probleme wie zum Beispiel die Endlagerung von nuklearem Abfall und die Erzielung eines weitreichenden gesellschaftlichen Einverständnisses sind noch immer Voraussetzung für eine Renaissance großen Ausmaßes.“ [Standard & Poor 2006]³

³ Developing new nuclear generation in the deregulated European market environment is a high-risk venture, given the long construction times and high capital costs. Siting issues are likely to be more sensitive today than in the 1970s and 1980s when most reactors were built. Furthermore, political support will remain fragile to nuclear safety performance worldwide. Another Chernobyl-like accident can rapidly cool the current cordial sentiments. Fundamental issues, such as the final storage of nuclear waste and far-reaching social consensus, are still likely to be required before a potential large-scale renaissance can happen [Standard & Poor 2006]

10.4 Werden neue nukleare Kraftwerke zusätzliche staatliche Unterstützung erfordern oder Zuschüsse brauchen um im liberalisierten Markt zu konkurrieren?

Wie bereits angemerkt, halten der nukleare Sektor und seine Vertreter ihre Industrie heute für wirtschaftlich. Der Welt Nuklear Verband (WNA) ist so selbstsicher, dass nun behauptet wird, dass *„Kernenergie im 21. Jahrhundert wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein wird, auch wenn die Vorteile der Kernenergie bei den globalen Umweltauswirkungen oder nationale Vorteile hinsichtlich Preisstabilität und Sicherheit der Energieversorgung wirtschaftlich nicht bewertet werden“*. [WNA 2005]⁴

Diese Sichtweise wird von Beobachtern, die nicht aus der Nuklearindustrie stammen, nicht geteilt; sie vertreten die Ansicht, dass Regierungsunterstützung und Förderungen nötig sein werden. Im Dezember 2005 sagten Standard & Poor über das Potenzial neuer Investitionen: *„Wenn der Bau von Kernkraftwerken im Vereinigten Königreich Realität werden soll, dann hat Standard & Poor beträchtliche Bedenken hinsichtlich der zukünftigen Struktur der Stromerzeugungsindustrie. Im Besonderen betrifft dies das Potential zur erhöhten Regulierung der liberalisierten Erzeugungsindustrie, eine erhöhtes Maß an politischer Einmischung in die Marktstruktur und die weitergehenden Aussichten für Kernenergie in einem kompetitiven Energiemarkt. Standard & Poor erwarten, dass Investitionen in Kernenergie abhängig sind von der langfristigen Stabilität hoher Strompreise im Vereinigten Königreich.“* [Standard & Poor 2005]⁵

Wenn Regierungen den nötigen Markt für Kernenergie schaffen, gibt es einige Unterstützungsmöglichkeiten, die in Betracht gezogen werden könnten. Diese beinhalten:

- Nukleare Verpflichtung: Dies würde jeden Stromversorger verpflichten, einen bestimmten Prozentanteil seines Stromes aus Kernkraftwerken zu beziehen. Die Regierung könnte dann den Anteil der Kernenergie im Energiemix verbindlich festlegen.
- Kapitalzuschuss: Die Regierung könnte Zuschüsse für neue Bauten bewilligen.
- Garantien für Kostenüberschreitungen: Unternehmen könnten Regierungsversicherungen anstreben, die sie für alle Zeit- oder Kostenüberschreitungen, die ihnen aus verlängerten Genehmigungsverfahren erwachsen, entschädigen. Dies könnte in der Form geschehen, dass die Regierung die Zinsen für Darlehensverlängerungen bezahlt.

⁴ „Nuclear power in the 21st Century will be economically competitive even without attaching economic weight to the global environmental virtues of nuclear power or to national advantages in price stability and security of energy supply“. [WNA 2005]

⁵ „If new construction of nuclear power is to become a reality in the U.K., Standard & Poor’s has significant concerns over the future structure of the generating industry. In particular, the potential for increased regulation of the liberalized generating industry, a higher level of political interference in the market structure, and the ongoing prospects for nuclear power in a competitive power market. Standard & Poor’s expects that investment in nuclear power will rely on the long-term sustainability of high electricity prices in the U.K. energy market“. [Standard & Poor 2005]

- Steuererleichterungen: Die Nuklearindustrie könnte von Steuern befreit werden oder Steuern könnten aufgeschoben bzw. reduziert werden. Dies könnte auf lokaler Ebene, durch Anpassung der business rates⁶ oder auch auf nationaler Ebene passieren.
- Lizenzierungsprozess: Die Nuklearindustrie möchte eine Vereinfachung des Lizenzierungsprozesses erreichen. Dies würde sicherstellen, dass einige Fragen (Kostenwahrheit im Energiesektor, nukleare Sicherheit, Wirtschaft, etc.) auf nationaler Ebene behandelt würden und sich Planung daher primär auf die Erfassung lokaler Umweltthemen beschränken könnte.
- Kohlenstoffpreis-Garantien: Die Nuklearindustrie ist um Zusatzfinanzierung und Garantien für den Preis von Kohlendioxid bemüht. Einige Vorschläge möchten für die Kernenergie zusätzliche Mittel lukrieren weil kein Co₂ während der Stromproduktion aus Kernkraftwerken emittiert wird (obwohl während des Baus der Anlagen und des Abbaus und der Erzeugung des Uranbrennstoffes sehr wohl emittiert wird). Weiters werden Vorschläge erörtert, die darin münden würden, dass die Regierungen eine Langzeitgarantie – vielleicht für bis zu 30 Jahren – für den Kohlenstoffpreis festlegen.

Der Bedarf an zusätzlicher Unterstützung wurde durch Pläne und Aktionen einiger OECD Länder hervorgehoben. Anfang 2005 wurde der Bau des ersten europäischen Druckwasserreaktors EPR in Finnland begonnen. Bei Bestellung des Reaktors wurden die Kosten auf € 1.500-1.800/ installiertem kW [AREVA 2005] geschätzt. Der Preis war jedoch künstlich niedrig gehalten aufgrund des verfügbaren Finanzpakets (welches Exportkreditgarantien der Regierungen von Frankreich und Schweden enthielt, was für Projekte innerhalb der EU sehr ungewöhnlich ist [Nucleonics Week 2005a] und einen unrealistisch niedrigen vertraglichen Verkaufspreis – dies scheint ein Lockangebot der Errichter zu sein). Dies wurde auch weiter von der Tatsache unterstrichen, dass die Kosten pro installiertem kW bei einem ähnlichen Reaktor in Frankreich um 25 % höher sein sollen. [Nucleonics Week 2005b]

In den USA, wo es seit mehr als 30 Jahren keine neue Bestellung eines Reaktors gab, wurde von der Regierung ein Förderungsprogramm vorgeschlagen um den Versuch eines nuklearen Bauprogramms zu starten. Dieses Paket beinhaltet [ICF Consulting 2005]:

- einen Steuerkredit von 1,8 cent/kWh für die ersten acht Erzeugungsjahre der ersten sechs Einheiten;
- eine bundesstaatliche Kreditgarantie von bis zu 80 % der Kosten von innovativer Technologie;
- einen Unterstützungsrahmen zur Abdeckung regulatorischer bzw. juristischer Verzögerungen im Wert von bis zu \$ 500 Millionen für die ersten beiden Reaktoren und \$ 250 Millionen für die nächsten vier;
- Forschungs- und Entwicklungsfonds im Wert von \$ 850 Millionen; und
- Unterstützung bei bereits angefallenen Entsorgungskosten (bis zu \$ 1,3 Milliarden).

⁶ Business rate - eine Abgabe die im Vereinten Königreich von den lokalen Behörden eingehoben wird, um die Kosten lokaler Serviceleistungen abzudecken, vergleichbar mit einer Art Körperschafts- bzw. Gewerbesteuer.

Es wird geschätzt, dass dieses Paket von Angeboten den US Steuerzahler \$ 13 Milliarden kosten wird [Lovins 2006].

10.5 Darf man die vollen Umweltkosten verschiedener Energieoptionen außer Acht lassen?

Energieproduzenten und Verbraucher begleichen nicht die vollen Umweltkosten, z.B. die Kosten, die durch radioaktive Abfälle sowie durch CO₂-, SO₂- oder andere Emissionen entstehen. Das ist eine Subvention für die verunreinigenden Energiequellen, wie Kohle, Gas und Kernenergie und benachteiligt saubere Technologien, wie beispielsweise Erneuerbare Energieträger. Studien, die vom DLR durchgeführt wurden ergaben, dass im Jahr 2003 das Förderprogramm für Erneuerbare Energien in Deutschland etwas mehr als eine Milliarde Euro ausmachte. Hätte es allerdings dieses Förderprogramm nicht gegeben und dieselbe Energiemenge wäre mit konventionellen Umwandlungstechnologien erzeugt worden, dann hätten die Umweltkosten mehr als 1,2 Milliarden Euro betragen.

Die Berechnung der Kosten der verschiedenen Schadstoffe und möglicher Risiken ist extrem komplex. Eine großangelegte Studie, teilweise von der Europäischen Kommission finanziert, ist im Gange. Im Juli 2001 veröffentlichte die Europäische Kommission eine Presseaussendung über die Studienergebnisse der ersten Phase des Projektes. Diese kam zu der Schlussfolgerung, dass *„die Kosten der Elektrizitätsproduktion von Kohle oder Öl sich verdoppeln und die Kosten der Elektrizitätsproduktion aus Erdgas um 30 % zunehmen würden, wenn externe Kosten wie Umwelt- und Gesundheitsschäden in Betracht gezogen würden. Es wird abgeschätzt, dass sich diese Kosten auf 1-2 % des gesamten Bruttoinlandsproduktes der Europäischen Union belaufen würden. ... Die externen Kosten müssen großteils von der Gesellschaft abgedeckt werden, weil sie in den Rechnungen der Stromkunden nicht aufscheinen“*⁷.

Der Bericht wurde kritisiert, weil die durch Kernenergie und mögliche Folgen verursachten Kosten nicht in vollem Umfang berücksichtigt wurden, noch die vollen Umweltauswirkungen der Erderwärmung. Über Kernenergie merkt der Bericht an, dass sie *„mit relativ geringen externen Kosten verbunden ist – wegen ihres geringen Einflusses auf die Erderwärmung und der geringen Wahrscheinlichkeit von Unfällen in den Kernkraftwerken der EU-Staaten.“*⁸ Einige Aussagen im Berichtsteil relativieren diese Schlussfolgerungen des Berichtes. Sie lauten z.B.: *„Verlässliche Werte über Unfälle, Wirkungen hochradioaktiver Abfälle, Proliferation von Nuklearmaterial und die Wirkungen von Terrorismus wurden in ExternE nicht berücksichtigt. Diese Weglassungen können sich signifikant auswirken und sollten in jeder Bewertung klar herausgestrichen werden“*. [ExternE 1998]⁹. Das Update der ExternE Studie von 2005 berücksichtigt die vollen Kosten der Kernenergie weiterhin nicht. [ExternE 2005]

⁷ „The cost of producing electricity from coal or oil would double and the cost of electricity production from gas would increase by 30 % if external costs such as damage to the environment and to health were taken into account. It is estimated that these costs amount up to 1-2 % of the EU's Gross Domestic Product (GDP), ...They have to be covered by society at large, since they are not included in the bills which electricity consumers pay“.

⁸ „Involves relatively low external costs due to its low influence on global warming and its low probability of accidents in the EU power plants“.

⁹ ExternE 1998 - „Reliable values of accident, high level wastes impacts, nuclear proliferation and impacts of terrorism have not been developed in ExternE. These omissions may well be significant and therefore should be clearly noted in any assessment“.

Bezüglich der Kernenergie existieren zwei Schlüsselbereiche in denen die Industrie subventioniert wird oder bevorzugte Bedingungen hinsichtlich ihrer Umweltkosten genießt, das sind:

A) Kosten für Dekommissionierung und Abfallmanagement

Nach Stilllegung von Nuklearanlagen ist ein signifikanter Zusatzaufwand erforderlich, um sie hinsichtlich Umweltbeeinträchtigungen sicher zu machen und den radioaktiven Abfall, der produziert wurde, zu verwalten. Viele dieser Schritte sind unerprobt und deshalb können ihre endgültigen Kosten nicht mit einem hohen Grad an Sicherheit abgeschätzt werden. In Europa wird angenommen, dass die Arbeiten, die notwendig sind, um abgebrannte Brennelemente der gesamten EU abzubauen und zu beseitigen oder zu lagern, wahrscheinlich Kosten in der Höhe von 200 Milliarden € verursachen würden. Citigroup nahm an, dass der globale Markt für Abfall und Dekommissionierung sich wahrscheinlich in der Größenordnung von einer Billion € (10^{12}) bewegt. [Citigroup 2006]¹⁰

Wie angemerkt, sollten während der Betriebsdauer einer Anlage Rücklagen angelegt werden, damit zukünftige Abbauarbeiten finanziert werden können. Wenn keine ausreichenden Rücklagen gebildet werden, so hat dies zwei Konsequenzen: Erstens spiegelt der Preis der verkauften Elektrizität nicht die wahren Umweltkosten wieder und ist deshalb eine unfaire Bevorzugung der Kernenergie gegenüber nichtnuklearen Erzeugungsquellen. Zweitens müssen die Abbauarbeiten trotzdem durchgeführt werden und es ist deshalb mehr als wahrscheinlich, dass zukünftige Steuerzahler – wahrscheinlich die einer anderen Generation – das werden finanzieren müssen.

In Europa ist dieses Thema nicht neu, aber wegen der Unterschiede in der politischen Ausrichtung der Mitgliedsstaaten und der Einführung von gemeinsamen Regeln für den Energiemarkt in der EU durchaus akut. Als Folge davon hat die Europäische Kommission festgestellt dass „diese Situation [keine einheitliche Dekommissionierungspolitik] zu Verzerrungen und Diskriminierungen zwischen den nun zueinander im Wettbewerb stehenden Kernenergieproduzenten aus verschiedenen Mitgliedsstaaten führen könnte. Dekommissionierungskosten sind eindeutig als Teil der Elektrizitätserzeugungskosten zu sehen. Sie dürfen weder aus dem Bereich der Stromübertragung quersubventioniert werden, noch mit staatlichen Hilfen subventioniert werden“ [EUROPEAN COMMISSION 1998].

Als Ergebnis dieser Bedenken schlug die Kommission ein gesetzliches Regelwerk vor, das neue Anforderungen an die Mitgliedstaaten einführen würde, um sicherzustellen, dass angemessene Rücklagen in getrennten Anlagen gebildet werden. Der Grund dafür ist, dass Elektrizitätsunternehmen davon abgehalten werden müssen, diese Rücklagen für ihre eigenen Zwecke, möglicherweise im Hochrisikobereich, zu verwenden – wie beispielsweise für Aquisitionen. Dies wurde allerdings von den Mitgliedsstaaten zurückgewiesen, im speziellen von Frankreich und Deutschland, die derzeit keine getrennten Fonds verlangen, und ihre EVU daher nicht vom Zugriff auf ihre Dekommissionierungsrücklagen abhalten.

Auf der EU-Ebene entwirft die Kommission nun eine neue Empfehlung für die Mitgliedsstaaten. Dies ist eine rechtlich nicht bindende Festlegung, die ein „Best-practice“ Modell für EVU in

¹⁰ „This situation [lack of uniformity of decommissioning policies] could lead to distortion and discrimination between now competing nuclear electricity producers from different Member States. Decommissioning costs are clearly seen as part of the electricity production costs. They may not be cross-subsidised from the transmission activity nor be directly subsidised via state aid.“ [EUROPEAN COMMISSION 1998]

der gesamten Union vorschlägt. Es wird nicht angenommen, dass dies die legislativen Anforderungen erfüllt oder ausreichende Transparenz und Garantien verlangen wird, um die derzeitige Situation zu verbessern.

B) Nukleare Versicherung

Es gibt internationale Abkommen, die einen Rahmen für die versicherungsmäßige Abdeckung von nuklearen Einrichtungen schaffen; eines davon wird als Wiener Konvention für zivilrechtliche Haftung für Schäden durch Nuklearanlagen (Vienna Convention on Civil Liability for Nuclear Damage) bezeichnet. Es schafft ein dreiteiliges System, in dem ein Teil der Haftung durch den Betreiber, ein weiterer durch den Staat, in dem die sich Anlage befindet, und ein weiterer durch die Vertragsstaaten abgedeckt ist. Trotzdem decken auch diese drei Teile nicht die vollen Kosten eines schweren Unfalls ab und es gibt eine fixe Deckelung für die Kompensation von Schäden aus Nuklearanlagen. Im Februar 2004 wurde vereinbart, dass die gegenwärtige Haftungsgrenze von 350 Millionen \$ auf 1,5 Milliarden angehoben werden soll. Ein Kernkraftwerksbetreiber wird verpflichtet mindestens 700 Millionen \$ Haftungsabdeckung vorzuhalten, der Nationalstaat mindestens 500 Millionen \$ und die öffentlichen Fonds auf der internationalen Vertragsstaatenebene werden die restlichen 300 Millionen \$ abdecken. Trotz dieser Erhöhung verbleiben weiterhin Restriktionen hinsichtlich des Ausmaßes der Versicherung, die ein Unternehmen für den Fall eines Unfalls eingehen muss, und auch hinsichtlich der Kompensationshöhe für Schäden aus einem nuklearen Unfall, die beansprucht werden kann. Wäre ein Erzeuger von Nuklearenergie verpflichtet, die potenziellen Kosten eines Nuklearunfalls zur Gänze abzudecken, würde dies die Stromerzeugungskosten der Kernenergie signifikant erhöhen. Wenn Europas größter Kernkraftwerksbetreiber, Electricité de France, seine Kraftwerke im Wege einer privaten Versicherung voll versichern müsste, aber ein Haftungslimit von ungefähr 420 Millionen € erhalten bliebe, so würden nach einer Schätzung die Prämien von 0,0017c€/kWh auf 0,019 c€/kWh steigen und dies würde die Erzeugungskosten um 8 % anheben. Gäbe es keine Deckelung und müsste der Betreiber die vollen Kosten eines „worst-cost“-Szenarios abdecken, würde das die Versicherungsprämien auf 5 c€/kWh erhöhen, und damit die Erzeugungskosten um 200 % anheben [European Commission 2003].

10.6 Werden die Kosten der Kernenergie sinken?

Die Kostenprobleme mit denen die Kernenergie konfrontiert ist, können durch einen Blick in die Zukunft verdeutlicht werden. Die Kosten erneuerbarer Energie werden aufgrund von verbesserter Technologie und von Größenvorteilen (Economies of Scale) voraussichtlich fallen. Über den Daumen geschätzt kann man sagen, dass der Preis für erneuerbare Energie um 20 % fällt wenn es zu einer Verdopplung der Produktion kommt. Die unten eingefügte Tabelle 10-3 unterstreicht die historische „Lernrate“, um welche die Preise für Technologien gefallen sind. Was man auch erkennen kann ist, dass der Preis für Kernenergie kaum gefallen ist.

Tab. 10-3 HISTORISCHE LERNRATEN VERSCHIEDENER TECHNOLOGIEN

Technologie	Periode	Lernrate %
Wind – OECD	1981-95	17
Solar PV – EU	1985-95	32
“Energiesparlampen“ (US)	1992-98	16
Gas Turbine – OECD	1984-94	34
Gas Pipelines – über Land	1984-97	4
Kernenergie – OECD	1976-93	6
Stromproduktion	1926-70	35

Quelle: McDonald und Schrattenholger 2001



Erneuerbare Energien werden aktiv auf der ganzen Welt entwickelt und sind für eine Reihe von Anwendungen passend, unter anderem für Transport, Heizen, Kühlen und Stromproduktion. Weiters bedeutet ihre Vielseitigkeit, dass sie schnell in einer passenden Größe für jegliche Anwendungen eingesetzt werden können. 2004 wurden etwa \$ 30 Milliarden in Erzeugungskapazitäten und Installationen im Bereich erneuerbarer Energien investiert. [REPN 2005]

Zahlen des britischen Ministeriums für Handel und Industrie unterstreichen die Erwartungen, dass in der nächsten Dekade die Preise für Strom aus einigen erneuerbaren Energiequellen beträchtlich fallen werden, jene für die Kernenergie sich hingegen vergleichsweise konstant entwickeln werden (Tabelle 10-4).

Folglich werden die wirtschaftlichen Argumente, die heute wiederverwendbaren Energien vor Kernenergie den Vorzug geben, wahrscheinlich über die Jahre an Stärke gewinnen.

Tab. 10-4 **DURCHSCHNITTSKOSTEN VON ERNEUERBARER ENERGIE UND KERNENERGIE**

Technologie	Gegenwärtige Kosten (US Cents/kWh)	Kosten nach 2020 mit Reifen der Technologie (US Cents/kWh)
Biomasse		
Elektrizität	5-15	4-10
Wärme	1-5	1-5
Ethanol für Fahrzeuge	3-9	2-4
Zusatz für Benzin und Diesel	(1,5-2,2)	(1,5-2,2)
Windenergie		
an Land	3-5	2-3
am Meer	6-10	2-5
Solarthermische Elektrizität (Einstrahlung 2500kWh/m² pro Jahr)		
	12-18	4-10
Wasserkraft		
Großanlagen	2-8	2-8
Kleinanlagen	4-10	3-10
Geothermische Energie		
Elektrizität	2-10	1-8
Wärme	0,5-5,0	0,5-5,0
Meeres-Energie		
Gezeitenstaudamm	12	12
Gezeitenfluss	8-15	8-15
Wellen	8-20	5-7
Photovoltaik ans Netz angeschlossen (nach Sonneneinstrahlung)		
1000 kWh/m ² pro Jahr (z.B. UK)	50-80	-8
1500 kWh/m ² pro Jahr (z.B. Südeuropa)	30-50	-5
2000 kWh/m ² pro Jahr (die meisten Entwicklungsländer)	20-40	-4
Inselanlagen (einschließlich Batterien) 2500 kWh/m² pro Jahr		
	40-60	-10
Kernenergie		
	5-7	3-5
Elektrizität vom Netz, durch Fossile Brennstoffe erzeugt (einschl. Leitung und Verteilung)		
Off peak	2-3	Kapitalkosten sinken mit techn. Fortschritt, Technologien reifen; steigende Brennstoffpreise könnten das kompensieren
Spitzenlast (peak)	15-25	
Durchschnitt	8-10	
Elektrifizierung ländlicher Gebiete		
	25-80	

Quelle: DTI 2005


lebensministerium.at

10.7 Schlussfolgerungen

In den letzten Jahren und Monaten gab es einen erneuten Optimismus in der Nuklearindustrie, dass in den liberalisierten Energiemärkten neue Kernkraftwerke bestellt werden würden. Dieser Optimismus basiert hauptsächlich auf den steigenden Preisen für Öl und Gas, die bei Gaskraftwerken, den Hauptkonkurrenten der Kernkraftwerke, zu einer Preissteigerung führen und daher in Relation die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie verbessern.

Daraus resultiert, dass die Nuklearindustrie nun argumentiert, mit den konventionellen Energieerzeugern voll konkurrieren zu können. Trotzdem ist die Finanzwelt skeptisch hinsichtlich der längeren wirtschaftlichen Lebensfähigkeit der Kernenergie. Speziell wird auf ungelöste finanzielle und öffentliche Themen hingewiesen, wie die Standortsuche, Management des nuklearen Abfalls und die Gefahr nuklearer Unfälle. Darüber hinaus weisen einige Vertreter der Finanzwelt auf die großen Fixkosten der Kernenergie hin, welche die finanziellen Risiken der Kernenergie erhöhen.

Obwohl es diese Behauptungen zur wirtschaftlichen Lebensfähigkeit der Kernenergie gibt, haben die OECD Länder, die einen Wiedereintritt in ein Ausbauprogramm von Kernkraftwerken in Erwägung ziehen, Finnland und die USA, direkte oder indirekte finanzielle Unterstützungsprojekte für den Nuklearsektor veranlasst. Im Falle der USA beinhaltet dies ein komplexes Paket an Maßnah-

men, die den Steuerzahler wahrscheinlich etwa 13 Milliarden \$ für ein Programm, das sechs bis acht Reaktoren umfasst, kosten wird.

Als Methode zur CO₂-Reduktion kann die Kernenergie mit einer großen Bandbreite an schon verfügbaren Alternativen mithalten. Besonders die Energieeffizienz hat zusätzlich zu den allgemeinen umweltbezogenen Vorteilen einen klaren wirtschaftlichen Vorteil und bringt zusätzliche eine Verbesserung der Versorgungssicherheit. Darüber hinaus zeigen Analysen der Projektkosten anderer CO₂-freier oder CO₂-armer Technologien, dass erneuerbare Energie aufgrund der mit wachsender Produktion sinkenden Preise zunehmend mit der Kernenergie in einen Preiswettbewerb treten kann.

10.8 Literatur

AREVA (2005): EPR Background and its Role in Europe. Didier Bueter, Areva, speaking at the Westminster Energy Forum, Nuclear New Build: Key Investment Issues and Implications for Strategic UK Energy Policy. 23rd June 2005

BP (2005): Statistical Review of World Energy, BP June 2005:
<http://www.bp.com/genericsection.do?categoryId=92&contentId=7005893>

Citigroup (2006): Nuclear Decommissioning Out with the Old and In with the New. CitiGroup, Industry report, 27th January 2006

CRS (2001): Nuclear Power: Prospects for Commercial Reactors: CRS Report for Congress. July 27th, 2001

DLR (2004): Wolfram Krewitt, Joachim Nitsch German Aerospace Center (DLR) Institute of Technical Thermodynamics, System Analysis and Technology Assessment Stuttgart, Germany Workshop on Long Term Energy Prospects and the Role of Renewable Energies Brussels, European Parliament 18th March 2004, Forecast Scenarios for the Potential Role of Renewable Energies

DTI (2005): Occasional Paper No1. Options for a Low Carbon Future: Review of Modelling Activities and an Update. Department of Trade and Industry, UK Government September 2005

European Commission (1998): Nuclear Safety and the Environment, Decommissioning of nuclear installations in the European Union. Supporting document for the preparation of an EC Communication on the subject of decommissioning nuclear installations in the EU, EUR 18860 1998, page 30

European Commission (2001): European Commission: 20th July 2001, New Research Reveals The Real Costs Of Electricity In Europe
<http://europa.eu.int/comm/research/press/2001/pr2007en.html>

European Commission (2003): CE, Solutions for Environment, Economy and Technology, Report for DG Environment January 2003 Environmentally harmful support measures in EU Member States, page 132

ExternE (1998): ExternE: 1998 update; Aggregation of Externalities, page 497, Volume 7

ExternE (2005): Rainer Freiderich, IER, University of Stuttgart. Externe: Methodology and Results. December 2005

OKO (2006): Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective - updated version, Uwe R Fritsche Oko Institute, January 2006

HSBC (2005): Nuclear Cleanup Costs: 2020 Fission? Financial Analysis of Nuclear Decommissioning Costs, HSBC September 2005

IAEA (2002): International Association of Atomic Energy (2002): Country Nuclear Power Profiles
<http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/cnpp2002/index.htm>

IEA/NEA (1998): Projected Costs of Generating Electricity – Update 1998, October 1998, ISBN 92 64 161 62-1, Table 9b

IEA/NEA (2005): Projected Costs of Generating Electricity - 2005 Update, ICF Consulting (2005): 2005 Energy Bill: The Impacts on Nuclear Power, ICF Consulting

Keepin and Kats (1988): Greenhouse warming; Comparative Analysis of Nuclear and Efficiency Abatement Strategies. Bill Keepin and Gregory Kats, Energy Policy, December 1988

Krause (2000): F. Krause, J. Koomey, D. Olivier (2000): Cutting Carbon Emissions While Making Money, California 2000

Lovins (2006): Nuclear power: Economics and climate-protection potential. Amory B. Lovins CEO, Rocky Mountain Institute, 6th January 2006

McDonald and Schratzenholzer (2001): Learning Rates for Energy Technologies, Energy Policy 2001

Nucleonics Week (2005a): EC will investigate “green power“ complaint of state aid to TVO EPR, Nucleonics Week Volume 46 / Issue 2 / January 13, 2005

Nucleonics Week (2005b): German utilities nearer decision to invest in Flamanville-3 Nucleonics Week Volume 46 / Issue 46 / November 17, 2005

NUKEM (1997): Is there Life After 40 for Western Europe’s Nuclear Plants? Plant Life Extension – Nukem Market Report, August 1997

REPN (2005): Renewables 2005, Global Status Report, Paper prepared for the Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, by the Worldwatch Institute

SDC (2006): Nuclear Power Won’t Fix It: Press Release for “The role of Nuclear Power in a Low Carbon Economy.“ Sustainable Development Commission, March 2006
<http://www.sd-commission.org.uk/pages/060306.html>

Standard and Poor (2005): UK Security of Supply Fears Spark Renewed Interest in Nuclear Energy, Standard and Poor’s 8th December 2005

Standard and Poor (2006): Credit Aspects Of North American And European Nuclear Power, Standard and Poor’s 9th January 2006

UBS (2005): More a question of politics than economics, Q Series: The Future of Nuclear, UBS Investment Research, March 2005

WNA (2005): The New Economics of Nuclear Power. World Nuclear Association, December 2005

11 Nuklear erzeugter Wasserstoff – eine nachhaltige Option?

Steven C. Sholly

August 2006

Inhaltsverzeichnis

11	Nuklear erzeugter Wasserstoff – eine nachhaltige Option?	234
11.1	Motivation: Wozu eine Wasserstoffwirtschaft?	234
11.2	Wasserstoff als Träger von Energie	236
11.2.1	Einleitung	236
11.2.2	Die gegenwärtige allgemeine Situation	237
11.2.3	Vorteile und Nachteile von Wasserstoff	238
11.2.4	Wasserstofflagerung	238
11.2.5	Wasserstoff-Verteilung	239
11.3	Wasserstoff-Produktionsverfahren	240
11.3.1	Überblick	240
11.3.2	Verfahren für nuklear erzeugten Wasserstoff	240
11.3.2.1	Einleitung	240
11.3.2.2	Elektrolyse	241
11.3.2.3	Thermochemische Verfahren	241
11.3.2.4	Hochtemperatur-Hydrolyse	242
11.4	Die Wasserstoffwirtschaft	242
11.4.1	Die Dimension der Wasserstoffwirtschaft	242
11.4.2	Zeitskala der Wasserstoffwirtschaft	244
11.4.3	Grenzen der Verfügbarkeit von Uran	244
11.4.4	Andere Perspektiven für die Wasserstoffwirtschaft	246
11.5	Umweltauswirkungen der Wasserstoffwirtschaft	246
11.6	Sicherheits- und Risikobetrachtungen zur Wasserstoffwirtschaft	247
11.6.1	Wasserstoff-BLEVEs und andere Risiken	247
11.6.2	Die Schwachstellen der Wasserstoff-Infrastruktur	248
11.6.3	Nukleare Risiken	249
11.7	Schlussfolgerungen	250
11.8	Literatur	252

11 Nuklear erzeugter Wasserstoff – eine nachhaltige Option?

11.1 Motivation: Wozu eine Wasserstoffwirtschaft?

Kernenergie wird häufig als wichtiges Element einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft genannt, die von einigen Befürwortern als die Lösung sowohl für den Klimawandel, wie auch für die Ölproblematik gefeiert wird. Themen dieses Berichts sind die Diskussion einiger Aspekte der Nachhaltigkeit sowohl der nuklearen Wasserstoffproduktion, als auch der Wasserstoffwirtschaft selbst.

Die meist angeführten Gründe für den Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft (d.h. Ersetzen fossiler Brennstoffe durch Wasserstoff, vor allem im Transportbereich) sind geradlinig und im Prinzip einfach:

- Der Verkehr ist gegenwärtig weltweit stark an die Verfügbarkeit von Kraftstoffen auf Erdöl-Basis gebunden.
- Fossile Brennstoffe werden auch zur Erzeugung elektrischer Energie und Heizwärme genutzt.
- Die Funde neuer Erdölvorkommen erreichten ihr Maximum in den frühen 1960ern, seither geht der Trend zurück. Die Ölproduktion hat ihren Spitzenwert in vielen Gebieten bereits überschritten; vermutlich wird das Maximum in allen derzeitigen Produktionsstätten innerhalb der nächsten Dekade überschritten werden¹. Aufgrund des Wirtschaftswachstums vor allem in Asien, aber auch in anderen Teilen der Welt, wird eine zunehmende Disparität zwischen den fossilen Brennstoffvorräten bzw. Förderraten und dem Bedarf entstehen. Die Konkurrenz um die verfügbaren Vorräte wird wachsen.
- Kohle, deren verbleibende Vorkommen größer als die von Erdöl angenommen werden, ist gegenwärtig nur für die Erzeugung elektrischer Energie – und in geringerem Ausmaß für Heizzwecke – kosteneffizient. Die Umweltauswirkungen der Kohleverbrennung sind derzeit weder im Kohlepreis, noch im Preis der daraus erzeugten Elektrizität enthalten. Vermehrte Nutzung von Kohle (z.B. als eine Quelle von Methan für die Dampfreformierungserzeugung von Wasserstoff) führt zu größeren CO₂-Freisetzungen, solange keine Sequestrierung von Kohlendioxid² erfolgt.

¹ Ungeachtet dieser Folgerung, die eine breite Unterstützung von technischen Experten (inklusive der OECD International Energy Agency) erfährt, nimmt die von der EU geförderte „European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform“ unbesorgt an, dass die Ölproduktion von den gegenwärtig 80 Millionen Barrel pro Tag auf 120 Millionen Barrel pro Tag im Jahr 2030 ansteigen wird [HFP 2005]. Dies wird durch keine entsprechende Analyse untermauert.

² Als Sequestrierung werden Verfahren bezeichnet, mit denen Kohlendioxid (CO₂) in ausgeförderte Erdöl oder Erdgaslager oder – künftig vielleicht im Ozean - eingelagert werden, um nicht in die Atmosphäre zu gelangen. Die Durchführbarkeit und Nachhaltigkeit der Kohlenstoff-Sequestrierung (im Sinn von permanenter Sequestrierung) wird hier nicht diskutiert. Außerdem werden die Umweltbelastungen durch die Kohlenstoff-Sequestrierung (sowohl die Umweltbelastung durch die Permanenz der Sequestrierungstechnologien selbst, wie auch die Umweltbelastungen, die durch Probleme dieser Technologien entstehen könnten) hier nicht angesprochen. Dass der Nachweis der Permanenz der Sequestrierung wesentlich für die Strategie ist, kann als anerkannt vorausgesetzt werden [IEA 2004]. Die Signifikanz des Problems der Permanenz der Sequestrierung kann im 2005-Jahresbericht der IEA gesehen werden, in dem die legalen Implikationen der Kohlenstoff-Sequestrierung untersucht werden [IEA 2005].

- Importierte fossile Brennstoffe stellen für eine Anzahl von Ländern und Regionen (einschließlich der Europäischen Union) eine signifikante ökonomische und nationale Abhängigkeit in der Versorgungssicherung dar: einerseits ist es aufwändig, einen Vorrat für mehr als 60-90 Tage zu halten und andererseits können die Importe mit Leichtigkeit unterbrochen werden. Daher besteht ein Anreiz, die fossilen Brennstoffe durch andere Energiequellen zu ersetzen, sobald ökonomisch vertretbare Quellen mit geringerer Verletzlichkeit der Versorgungssicherheit identifiziert werden können³.
- Die meisten Wissenschaftler schreiben den anthropogenen Anteil des Klimawandels weitgehend der Emission von Treibhausgasen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu. Eine Maßnahme zur Reduktion der Emission von Treibhausgasen ist natürlich, fossile Brennstoffe durch andere Energieträger zu ersetzen, die keine oder weniger Treibhausgasemissionen verursachen.
- Wenn Wasserstoff ökonomisch und mit minimalen Umweltauswirkungen hergestellt, verteilt oder gelagert und genutzt werden kann, dann ist er ein „sauberer“ Brennstoff mit Emissionen, die hauptsächlich aus Wasserdampf bestehen und eventuell aus Stickoxiden im Fall der Wasserstoffnutzung für Hochtemperaturverbrennung. Wasserstoff könnte daher als Beitrag zum Ersatz fossiler Brennstoffe gelten – insbesondere im Verkehrssektor.

Eine Ersatzstrategie, die vorgeschlagen wird, ist der Einsatz von Kernkraftwerken zur Wasserstoffproduktion (anfangs aus Kernspaltungs-Kraftwerken und später – sollten Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit demonstriert sein – aus Fusionsanlagen⁴). Viele, für die Kernenergie die oben genannten Kriterien erfüllt – d.h. wirtschaftliche Produktion bei minimaler Umweltbeeinflussung – sehen eine Wasserstoffwirtschaft basierend auf nuklearer Herstellung als mögliche und nachhaltige Option zur Erfüllung der Energienachfrage der Zukunft. Dieser Anspruch war einer der Auslöser für die vorliegende Studie.

Innerhalb der verschiedenen Facetten einer möglichen Wasserstoffwirtschaft ist die vorliegende Studie auf den nuklear produzierten Wasserstoff als Kraftstoff für leichte Kraftfahrzeuge (Personenkraftwagen, Pick-up-Lastkraftwagen, Sportfahrzeuge, usw.) fokussiert.

³ Man beachte, dass von vielen Autoren die Kernenergie zu einer derartigen Energiequelle erklärt wird. Fakt ist allerdings, dass für die Europäische Union Uran einen importierten Brennstoff darstellt. Obwohl es leichter ist (in Bezug auf Lagerungskapazität), einen Uranvorrat als Absicherung gegen Lieferunterbrechungen zu lagern, kann der Nachschub nichtsdestoweniger abgeschnitten werden. In 2004 wurden 99 % des von der EU gekauften Urans von 10 Staaten außerhalb der EU bezogen (75 % aus nur vier Ländern: Australien, Kanada, Niger und der Russischen Föderation). Nur etwa 1 % kam aus Quellen innerhalb der EU [Euratom 2004]. Eine alternative Rohstoffquelle zu entwickeln ist keine einfache Aufgabe, da die Identifizierung geeigneter Uranlager und der Aufbau der nötigen Anlagen zur Förderung des Erzes, der Aufarbeitung des Erzes zum Uranoxidkonzentrat (yellow cake), die Konversion zu Uranhexafluorid bis hin zur Urananreicherung Jahre erfordert.

⁴ Fusionskraftwerke basierend auf dem Tokamak-Konzept befinden sich im Planungsstadium der Machbarkeit (der experimentelle Fusionsreaktor ITER-Tokamak wurde entworfen, aber noch nicht gebaut). Falls die derzeitigen Konzepte sich als machbar erweisen, ist es wahrscheinlich, dass ziemlich große Anlagengrößen erforderlich sein werden, um den Prozess ökonomisch zu betreiben, und sehr große Einheiten (im Bereich von 2000-5000 MWe) könnten nötig sein, um in einem liberalisierten Markt zu bestehen [IRF 2004]. Bei derart großen Einheiten wäre die Kapazität außerhalb des Spitzenbedarfs erheblich und könnte zur Massenerzeugung von Wasserstoff genutzt werden, der dann in Kraftwerken zum Lastausgleich eingesetzt werden könnte.

11.2 Wasserstoff als Träger von Energie

11.2.1 Einleitung

Wasserstoff ist infolge seiner chemischen Affinität zu anderen Elementen, wie Sauerstoff (Bildung von Wasser), keine primäre Energiequelle. In der Natur wird nur sehr wenig freier Wasserstoff gefunden. Will man daher Wasserstoff als Brennstoff verwenden, muss er zunächst chemisch aus einem Ausgangsmaterial gewonnen werden. Die chemische Gewinnung von Wasserstoff aus einem Ausgangsmaterial ist ein Prozess, der selbst Energie erfordert.

Daher ist der Wasserstoff am besten als „Träger von Energie“ anzusehen. Er kann als „Brennstoff“ zur Erzeugung von Elektrizität in stationären oder transportablen Brennstoffzellen eingesetzt werden, wenn er in großem Rahmen hergestellt wird. Man muss jedoch die Frage stellen, unter welchen Umständen es Sinn macht (vom Standpunkt der Effizienz, des Primärenergieverbrauchs, der Umweltbeeinflussung, usw.) die primären Energiequellen zur Produktion von Wasserstoff zu verwenden, anstatt sie direkt zu nutzen. Wasserstoffproduktion mit Hilfe von Elektrizität außerhalb der Lastspitzen könnte die Wasserstoffproduktion aus anderen Quellen ergänzen. Wasserstoff könnte auch mit Hilfe intermittierender Energiequellen – wie Solar- oder Windkraft – erzeugt und für den späteren Verbrauch gespeichert werden, wenn die intermittierende Energiequelle nicht verfügbar ist. [IEA 2003b]

Wasserstoff kann als komprimiertes Gas oder als Flüssiggas gespeichert, verteilt und transportiert werden. Voraussetzung für eine umfassende „Wasserstoffwirtschaft“ sind ökonomische Möglichkeiten der Wasserstoffproduktion und der Entwicklung und des Aufbaus einer geeigneten Infrastruktur.

Wasserstoff kann aus mehreren Rohstoffen, u.a. Wasser⁵ und Erdgas (Ausgangsmaterial der meisten derzeitigen Wasserstoffproduktionen), hergestellt werden. Die Verwendung von Kohlenwasserstoffen zur Wasserstoffproduktion hat dieselben Nachteile wie deren direkte Verbrennung – sie verringert die verfügbaren Kohlenwasserstoffvorräte und, wenn nicht von Kohlenstoff-Sequestrierung begleitet (was Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit des Verfahrens hat), werden auch Treibhausgase emittiert (hauptsächlich Kohlendioxid). Eine stark ausgeweitete Wasserstoffproduktion aus Erdgas in Kombination mit Kohlenstoff-Sequestrierung als Maßnahme zur Reduzierung der Treibhausgasemission wäre wegen der begrenzten Erdgasvorkommen nicht nachhaltig, selbst wenn keine nachhaltigen Probleme bei der Sequestrierung auftreten. Die Verwendung von Erdgas als Ausgangsmaterial für die Wasserstoffproduktion könnte aber eine Übergangsstrategie zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen⁶ sein, solange keine anderen nicht-fossilen Ausgangsmaterialien für Wasserstoff entwickelt und in kommerziellem Betrieb sind.

⁵ Es ist klar, dass es auf der Welt Gegenden gibt, wo (relativ) sauberes Wasser in großer Menge kaum zur Verfügung steht. Von solchen Regionen wird nicht erwartet, dass Wasserstoff produziert wird, dort wird man besser auf andere verfügbare Energiequellen in primärer Form zurückgreifen, wie Elektrizität aus Windkraft- oder Solaranlagen. Wenn in solchen Regionen Wasserstoff als Kraftstoff für Fahrzeuge benötigt wird, kann es sich als günstiger erweisen, den Wasserstoff anderswo zu produzieren und ihn dorthin zu transportieren, wo er gebraucht wird.

⁶ Methan könnte aus Biomasse erzeugt werden und dann zur Wasserstoffproduktion dienen. Ein solches Verfahren würde ineffizient sein – und es würde vermutlich mehr Sinn machen, das Methan direkt zu nutzen, als einen zusätzlichen Verfahrensschritt durch die Nutzung als Rohstoff für die Wasserstoffproduktion einzufügen. Die Kohlenstoff-Sequestrierung würde natürlich zusätzliche Kosten für das Verfahren bedeuten, abgesehen von dem Faktum, dass – abhängig von der gewählten Methode der Sequestrierung – die Sequestrierung hinsichtlich des Volumens begrenzt oder hinsichtlich der Umweltauswirkungen unsicher ist.

11.2.2 Die gegenwärtige allgemeine Situation

Wasserstoff wird derzeit hauptsächlich bei der Produktion von Ammoniak für Düngemittel und beim Hydrocracken von Erdöl verwendet, in kleineren Mengen auch für diverse hochreine chemische und industrielle Anwendungen, wie Fahrzeugbrennstoff (Brennstoffzellen), als Brennstoff für Kraftwerke auf Brennstoffzellen-Basis und als Raketenantrieb.

Die gegenwärtige jährliche Weltproduktion von Wasserstoff beläuft sich auf etwa 50 Millionen metrische Tonnen⁷, das sind 1,5 % des gesamten Weltenergiebedarfs [ACIL 2003]. Die derzeitige Jahresproduktion von Wasserstoff in den USA beträgt etwa 11 Millionen metrische Tonnen, die Europas etwa 8 Millionen metrische Tonnen.

Da Lagerung und Transport von Wasserstoff derzeit teuer sind, wird der Wasserstoff meist dort erzeugt, wo er gebraucht wird. Wenn Wasserstoff transportiert wird, erfolgt dies durch Pipelines oder über die Straße mit zylindrischen Containern, Gasflaschen und Tieftemperaturtanks, eine kleine Menge auch auf der Schiene oder auf Lastkähnen. Der Transport von Hochdruckbehältern und Gasflaschen erfolgt normalerweise über Distanzen von 160-320 km von der Produktionsstätte. Für Distanzen bis zu 1600 km wird Wasserstoff als Flüssigkeit in Tieftemperaturtanks, Güterwaggons oder Lastkähnen transportiert. In den USA werden in einigen Regionen, in denen sich große Wasserstoffraffinerien und chemische Fabriken befinden (hauptsächlich in Kalifornien, Indiana, Louisiana und Texas), Wasserstoff-Pipelines verwendet. Auch in Europa gibt es Wasserstoff-Pipelines.

Die gegenwärtigen Ausgangsmaterialien für die Wasserstoffproduktion sind:

- 48 % Erdgas.
- 30 % Erdöl.
- 18 % Kohle.
- 4 % durch Elektrolyse von Wasser⁸.

Es sei darauf hingewiesen, dass demzufolge 96 % der derzeitigen Wasserstoffproduktion aus fossilen Brennstoffquellen kommt, in erster Linie (78 %) aus einer Kombination von Erdgas und Öl, und daher mit der Emission von Treibhausgasen verbunden ist. Falls sich eine Wasserstoffwirtschaft entwickeln sollte, müssten diese Ausgangsmaterialien für Wasserstoff nahezu vollständig ersetzt werden, oder mit Kohlenstoff-Sequestrierung gekoppelt werden.

Als projektierte industrielle Nachfrage an Wasserstoff wird für 2030 das Fünf- bis Sechsfache des gegenwärtigen Produktionsniveaus erwartet [Buckner 2002]. Man beachte, dass dies nur

⁷ Wenn dieser gesamte Wasserstoff verbrannt würde, um Elektrizität zu erzeugen, wäre die netto-Elektrizitäts-Produktionskapazität etwa 200 GW [Forsberg 2002]. Die gesamte Weltproduktionskapazität an Elektrizität beträgt etwa 3.600 GW (wovon etwa 370 GW aus Kernkraft stammen) [EIA 2005].

⁸ Diese Quelle von Wasserstoff ist hauptsächlich ein Nebenprodukt der Massenproduktion von Chlor.

der Anstieg für industrielle Zwecke ist, d.h. losgelöst von jeder anderen Nachfrage, die durch eine Wasserstoffwirtschaft für Fahrzeug-Kraftstoffe oder andere Zwecke entstehen könnte⁹.

11.2.3 Vorteile und Nachteile von Wasserstoff

Wasserstoff hat gewisse Vorteile als Brennstoff: Er ist nicht toxisch und ist kein Karzinogen oder Mutagen, er ist geruchlos, farblos und geschmacklos. Das Verbrennungsprodukt von Wasserstoff ist Wasser. Wasserstoff in seiner gasförmigen und komprimierten gasförmigen Form ist viel leichter als Luft und verteilt sich daher schnell, wenn er freigesetzt wird (anders verflüssigter Wasserstoff, der direkt nach der Freisetzung schwerer ist als Luft).

Wasserstoff hat als Brennstoff auch Nachteile. Er ist sehr leicht brennbar und kann daher zu den gleichen gefährlichen Verbrennungs- und Explosionserscheinungen führen, wie LPG (liquefied propane gas, verflüssigtes Propangas) und LNG (liquefied natural gas, verflüssigtes Erdgas). Wasserstoff muss signifikant komprimiert oder verflüssigt werden, um als Brennstoff brauchbar zu sein. Wegen seiner sehr kleinen Molekülgröße diffundiert er schnell durch sehr kleine Öffnungen, weshalb die Erfordernisse für die Dichtigkeit von Rohrleitungen und Containersystemen wesentlich stringenter sind, als für Brennstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis.

11.2.4 Wasserstofflagerung

Wenn Wasserstoff in großem Maßstab produziert wird, muss er entweder an Ort und Stelle verbraucht, oder verflüssigt und bei tiefen Temperaturen als Flüssigkeit gelagert werden. Wenn er in kleineren Quantitäten als Gas erzeugt wird, muss er ebenfalls an Ort und Stelle verbraucht werden oder komprimiert und für die Verteilung gelagert werden. Sowohl Kompression als auch Verflüssigung sind energieintensive Verfahren, die – unabhängig von der Art und den Kosten der Wasserstoffproduktion – die Gesamteffizienz der Wasserstoffwirtschaft reduzieren und die Kosten erhöhen.

Neuere Untersuchungen zur Anwendung als Fahrzeug-Kraftstoff basieren auf Konzepten der Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse an der Stelle der Auslieferung (d.h. an Tankstellen). Dadurch werden die Kosten und Auswirkungen der Massenproduktion, Lagerung und Transport über größere Strecken vermieden. Der Gesamtprozess wird dem Wesen nach zu einem „just-in-time“ Verfahren. (Im Fall eines Stromausfalls kann natürlich kein Wasserstoff erzeugt und ausgeliefert werden. Aber das ist nicht anders als bei bestehenden Verteilungssystemen, da Kraftfahrzeuge bei Stromausfall auch nicht mit Benzin oder Diesel betankt werden können.)

Je länger Wasserstoff gelagert oder in Verteilung begriffen ist, umso mehr geht an die Umwelt verloren. Ein System, das Wasserstoff „just-in-time“ an Tankstellen durch Elektrolyse erzeugt, erscheint auf Dauer effizienter und kosteneffektiver zu sein, als ein System mit zentralisierter Wasserstofferzeugung in großem Maßstab, Lagerung und Verteilung zu den Tankstellen.

⁹ Dieser Anstieg von 50 Millionen Tonnen auf 250-300 Millionen Tonnen pro Jahr ist weit größer als die Schätzungen des Bedarfes für eine Wasserstoffwirtschaft für Fahrzeug-Kraftstoffe (23 Millionen Tonnen pro Jahr für die EU). Die Industrie wird einen Weg finden müssen, diesen Bedarf unabhängig von einer Wasserstoffwirtschaft für Fahrzeug-Kraftstoffe zu decken, wobei offenkundig ist, dass die Ausgangsmaterialien nicht weiterhin hauptsächlich Erdgas und Öl sein können.

Die Lagerung von Wasserstoff aus einer Großproduktion wird entweder eine Kurzzeit-Lagerung als komprimiertes Gas sein, vor der Verteilung über Wasserstoff-Pipelines zum Endverbraucher, oder, wahrscheinlicher, als Tieftemperatur-Flüssigkeit, die auf Nutzung oder Verteilung wartet. Lagerung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff beinhalten Risiken, die eine sorgfältige Betrachtung erfordern.

11.2.5 Wasserstoff-Verteilung

Im Falle der Großherstellung von Wasserstoff, der nicht am Ort der Produktion verbraucht wird, müsste neben dem Lagerungssystem ein Verteilungssystem für die Auslieferung an den Endverbraucher entwickelt werden. Zwei Möglichkeiten für die Wasserstoff-Verteilung zu den Endverbrauchern sind Tieftemperaturtanks (entweder auf LKWs oder auf der Schiene) und Rohrleitungen für komprimiertes Wasserstoffgas.

In Europa transportieren LKWs für flüssigen Wasserstoff typischerweise 3,35 metrische Tonnen dieses Stoffes. Bahnwaggons für flüssigen Wasserstoff befördern, je nach Größe, 2,3-9,1 metrische Tonnen. Der Siedeverlust an flüssigem Wasserstoff in den Tieftemperaturtanks auf LKWs und auf der Schiene beträgt 0,3-0,6 % pro Tag. Die Verluste während der Umladung von flüssigem Wasserstoff von einem Tieftemperaturtank zu einem Speichertank beim Endverbraucher sind 10-20 % der gesamten Ladung [Amos 1998]. Die Wirkungen solcher Verluste auf die Chemie der Atmosphäre sind noch nicht geklärt, insbesondere nicht in der Größenordnung, die diese Verluste in einer ausgewachsenen Wasserstoffwirtschaft erreichen könnten. Dies ist ein Punkt der weitere Untersuchungen erfordert.

Pipelines für komprimierten Wasserstoff werden in einigen Regionen der Welt benutzt (Belgien, Kanada, Frankreich, Deutschland, Niederlande, Großbritannien und USA), die längste davon ist 900 km lang (ein Netzwerk der Air Liquide in Frankreich, Belgien und den Niederlanden) [Vinjamuri 2004].

Aufgrund der Kosten, die für die Wasserstofflagerung und -verteilung (als Folge der niedrigen Dichte von Wasserstoff, sogar im flüssigen Zustand) anfallen, taucht in der Literatur immer häufiger eine Fokussierung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit dezentraler Produktion mittels Elektrolyse und anderer Verfahren auf, anstelle einer zentralisierten Produktion in großem Rahmen. Dies verschiebt die Natur der Wasserstoffwirtschaft völlig von dem traditionellen Großindustrie-Fokus auf lokale Brennpunkte, wo Wasserstoff „just-in-time“ in den nötigen Quantitäten produziert wird, ohne auf großindustrielle Anlagen zurückzugreifen, die aufwändige Lagerungs- und Verteilungsinfrastrukturen benötigen.

11.3 Wasserstoff-Produktionsverfahren

11.3.1 Überblick

Es gibt grundsätzlich nur drei Typen der Wasserstoffproduktion, und alle anderen Methoden sind Variationen dieser drei Verfahren:

- Elektrolyse;
- Dampfaufspaltung von Methan;
- Thermochemische Wasseraufspaltung;

Das Verständnis von Elektrolyse und Dampfaufspaltung von Methan ist gut; diese Verfahren werden derzeit angewandt. Die Dampfaufspaltung des fossilen Brennstoffs Methan in dem für die Wasserstoffwirtschaft erforderlichen Ausmaß setzt jedoch die Sequestrierung des dabei freiwerdenden Kohlenstoffs voraus, soll die Freisetzung großer Mengen an Treibhausgasen verhindert werden.

Die thermochemische Wasseraufspaltung konnte bisher, trotz Dekaden der Forschung und Diskussion nur, im Labormaßstab demonstriert werden¹⁰. Die Aufwärts-Skalierung vom Labormaßstab zu kommerziellem Umfang, wie sie von den Befürwortern der nuklearen thermochemischen Wasseraufspaltung erwartet wird, bedeutet etwa eine Vergrößerung um einen Faktor von 10 Millionen. Offensichtlich bestehen bei den zwei wichtigsten thermochemischen Wasseraufspaltungszyklen (I-S und Ca-Br) signifikante Materialprobleme wegen der hohen Prozesstemperaturen (800°C) und der extremen Korrosivität der auftretenden Schwefelsäure bzw. Bromwasserstoffsäure. Außerdem scheint die Gefahr der bei den thermochemischen Wasseraufspaltungsverfahren möglichen chemischen Unfälle bisher kaum ernsthaft betrachtet worden zu sein.

Leider haben bisher weder die Befürworter einer nuklearen Produktion von Wasserstoff, noch deren Kritiker überzeugende ökonomische Argumente vorgebracht. Es fehlt an einer fundierten Kostenanalyse über den gesamten Lebenszyklus – einschließlich ökonomischer, Umweltschutz- und anderer Kosten – um einen Vergleich zwischen nuklear produziertem Wasserstoff und Wasserstoff aus anderen Verfahren zu ermöglichen.

11.3.2 Verfahren für nuklear erzeugten Wasserstoff

11.3.2.1 Einleitung

Obwohl jede Kernkraftwerkstechnologie für die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse oder thermochemische Wasseraufspaltung eingesetzt werden kann, sind spezifische, effizientere Technologien erforderlich, um wirtschaftlich konkurrenzfähige Wasserstoffkosten zu erzielen. Einige mögliche Technologien werden im Folgenden als Beispiele für die derzeitige Diskussion aufgeführt. Kernenergie als Energiequelle für die Herstellung von Wasserstoff wird derzeit außer in experimentellem Rahmen nicht eingesetzt¹¹.

¹⁰ Die bisher benannte Spitzenproduktion war 0,031 m³/Stunde für eine Woche in 2004 [Shiozawa 2006]. Dies ist ein Faktor von 3 Millionen kleiner als die von den Japanern ins Auge gefasste industrielle Anlage [Shimizu 2001].

¹¹ Die Anlage des Hochtemperaturtestreaktors (HTTR) in Japan wird im experimentellen Rahmen für die Herstellung von Wasserstoff mit Kernenergie genutzt [Ryskamp 2003: 13].

11.3.2.2 Elektrolyse

Jedes Kernkraftwerk, das Elektrizität erzeugt, könnte zur Herstellung von Wasserstoff in einem elektrolytischen Prozess eingesetzt werden. In einem solchen Fall könnte die elektrolytische Produktionsanlage an einem geeigneten Platz mit ausreichendem Netzzugang angesiedelt sein, nicht notwendigerweise nahe dem Kernkraftwerk. (Die Gesamteffizienz hinsichtlich der Verwendung von Elektrizität für die elektrolytische Wasserstoffproduktion würde bei größerer Nähe infolge geringerer Übertragungsverluste leicht steigen.)

Die elektrolytische Produktion von Wasserstoff ist derzeit zu teuer für eine Wasserstoffproduktion in großem Maßstab und wird meist nur für Anwendungen genutzt, die sehr reinen Wasserstoff benötigen (dieser Wasserstoff ist zu teuer für die Nutzung als Fahrzeug-Kraftstoff). Wegen der relativen Ineffizienz des Verfahrens (der Wirkungsgrad liegt bei 25-30 %) [Schultz 2005] wäre eine billige Elektrizitätsquelle (z.B. billige Wasserkraft) erforderlich, um die Elektrolyse für andere Anwendungen ökonomisch zu machen.

Das Internationale Forum Generation IV¹², eine internationale Koalition von interessierten Ländern, identifizierte sechs fortgeschrittene Reaktortechnologien für die Entwicklung bis 2030. Nur bei einem dieser Entwürfe – der VHTR (Very High Temperature Reactor) – ist nukleare Wasserstoffproduktion vorgesehen; nach derzeitigem Konzept ein mit Helium gekühlter 600 MWt-Modul [Park 2003]. Die nukleare VHTR-Wasserstoff-Initiative hat sich den Betriebsbeginn einer Demonstrationsanlage für nukleare Wasserstoffproduktion im Jahr 2017 zum Ziel gesetzt [Henderson 2004]. Wasserstoff könnte dabei auf zwei verschiedenen Wegen erzeugt werden: Erstens könnte der erzeugte Strom des Kernkraftwerkes zur Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse eingesetzt werden; zweitens könnte die hohe Prozesswärme (etwa 50 MWt des 600 MWt-Outputs) für die Erzeugung von Wasserstoff durch einen thermochemischen Prozess herangezogen werden.

11.3.2.3 Thermochemische Verfahren

Die direkte Verwendung der Prozesswärme eines Kernkraftwerkes zur Unterstützung der Wasserstoffproduktion erfordert Reaktoren mit sehr hoher Kühlmitteltemperatur. Die Kühlmitteltemperatur der meisten derzeit betriebenen Reaktoren ist bei weitem zu niedrig, um eine thermochemische Wasserstoffproduktion ökonomisch zu gestalten¹³. Zukünftige Reaktorkonzepte mit Hochtemperatur-Heliumgas, flüssigem Salz oder flüssigem Metall (z.B. Blei, Blei-Wismut) als

¹² Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieses Berichts besteht das Internationale Forum Generation IV aus 10 Nationen (Argentinien, Brasilien, Kanada, Frankreich, Japan, Südafrika, Korea, Schweiz, Großbritannien, USA) und Euratom.

¹³ Die Kühlmitteltemperatur der derzeit betriebenen Kernkraftwerke liegt bei 320°C. Hochtemperaturreaktoren für den Einsatz zur thermochemischen Wasserstoffproduktion müssten primäre Kühlmitteltemperaturen von 750°C und mehr haben. Je höher die Kühlmitteltemperatur, umso größer ist die erwartete Effizienz des thermochemischen Prozesses.

Kühlmittel werden auf ihre Nutzbarkeit untersucht.¹⁴ Die Effizienz der thermochemischen Wasserstoffproduktion wird auf etwa 50 % geschätzt [Schultz 2002].

11.3.2.4 Hochtemperatur-Hydrolyse

Schließlich wurde noch ein hybrides Verfahren, die so genannte Hochtemperatur-Hydrolyse, vorgeschlagen, das sowohl die Hochtemperatur-Prozesswärme (700-900°C) als auch die Elektrizität nutzt [Forsberg & Pickard 2002]. Die Effizienz dieses Verfahrens wird auf etwa 40 % geschätzt [Schultz 2002], abhängig von der Temperatur des Reaktorkühlmittels. Es wird erwartet, dass Hochtemperaturreaktoren eine Verbesserung des Wirkungsgrades bringen könnten.

11.4 Die Wasserstoffwirtschaft

11.4.1 Die Dimension der Wasserstoffwirtschaft

Überschlagsberechnungen deuten darauf hin, dass eine Wasserstoffproduktion in der Größenordnung von 23 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr erforderlich wäre, nur um den Kraftstoffverbrauch der derzeitigen Personenkraftwagenflotte in den 25 Ländern der Europäischen Union zu decken. Um die Probleme zu veranschaulichen, die mit der Produktion einer derartigen Menge verbunden sind, wurde für verschiedene Energiequellen grob abgeschätzt, welcher Aufwand erforderlich wäre, würde der Wasserstoff nur aus dieser Quelle erzeugt [IRF 2006]:

- a. Dreiundsechzig EPR-Kernkraftwerke mit Kapitalkosten von 159 Milliarden € für die Nuklearanlagen.
- b. Etwas über 5.000 km² photovoltaische Solaranlagen mit Kapitalkosten der Größenordnung 1,08 Billionen €.
- c. Etwa 63.000 Drei-Megawatt-Windturbinen, die etwa 2.500 km² Bodenfläche benötigen; Kapitalkosten in der Größenordnung von 1-3 Millionen € pro Windturbine, ohne die angeschlossenen Anlagen und Kosten für den Grund.
- d. Einhundertfünf modulare H₂-MHR-Nuklearanlagen (MHR: Modular Helium Reactor) mit angeschlossenen thermochemischen Wasseraufspaltungsanlagen für die Wasserstoffproduktion, Kapitalkosten rund 154 Milliarden €.

¹⁴ Ein Konzept für nuklear erzeugten Wasserstoff (AHTR: Advanced High Temperature Reactor) wurde vom Oak Ridge National Laboratory vorgeschlagen; dabei wird der Kernbrennstoff mit flüssigen Fluoridsalzen gekühlt. Kühlmitteltemperaturen von 750°C oder sogar 850°C werden angestrebt [Forsberg & Pickard 2002].

Von Argonne National Laboratory und der Texas A&M University wurde STAR-H₂ (Secure Transportable Autonomous Reactor for Hydrogen Production) für die Wasserstoffproduktion vorgeschlagen. STAR-H₂ ist ein 400 MWt Blei-gekühlter schneller Reaktor mit einer projektierten Kern-Austrittstemperatur von 780 °C. Ein Zwischenzyklus auf Helium-Basis soll die Prozesswärme vom Kernkraftwerk zu einer thermochemischen Wasserstoffproduktionsanlage transferieren. STAR-H₂ ist ein Reaktor der Generation IV, dessen Betriebsbeginn nicht vor 2030 erwartet wird [Wade, Doctor & Peddicord 2002].

Das Japanische Kernforschungsinstitut JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) bereitet die Demonstration der nuklearen Wasserstoffproduktion mit Hilfe des Hochtemperaturtestreaktors HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor) vor. Es wird ein thermochemischer Prozess auf Jod-Schwefel-Basis unter Verwendung des HTTR Wärmeoutputs zur Wasserstoffproduktion entwickelt [Forsberg & Pickard 2002].

e. Wasserstoffproduktion aus Biomasse über die Biogasherstellung und die Dampf-Methan-Reforming-Technologie zur Wasserstofferzeugung mit erforderlichen 464 Anlagen und einem Flächenbedarf von 259.376 km² für die Biomasseproduktion (entspricht 6,5 % der Bodenfläche der EU), mit Kapitalkosten von 175 Milliarden € nur für die Biogas- und Dampfaufspaltungs-Anlagen. Dazu würden noch die Kosten für die Verflüssigungsanlagen und die Infrastruktur für die Flüssigwasserstoffverteilung kommen.

In allen oben beschriebenen Fällen würden die Infrastruktur für die Wasserstoff-Tankstellen (und in zwei Fällen auch für die Verteilungssysteme für den Flüssigwasserstoff) sowie die jährlichen Betriebs- und Wartungskosten (O & M) dazu kommen. Die Kosten für die Wasserstofftankstellen-Infrastruktur im Fall der dezentralen Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse werden auf 94,5 – 202,5 Milliarden € geschätzt. Für die Infrastrukturkosten eines Systems, das auf der Verteilung von Flüssigwasserstoff aus zentraler Großproduktion beruht - mit Tankstationen, die komprimiertes Gas aus dem Flüssigwasserstoff erzeugen - liegen keine Abschätzungen vor.

Zusammengefasst kostet der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft mindestens 250 bis 500 Milliarden € zur Bereitstellung des Kraftstoffes für die derzeitige PKW-Flotte der 25 EU-Länder. Zum Vergleich: Das Bruttoinlandsprodukt der EU 25 für 2005 wurde auf etwa 10.000 Milliarden € geschätzt [CIA 2006].

Abgesehen von den Kosten bestehen auch noch andere Beschränkungen für die einzelnen Optionen, wie etwa die Verfügbarkeit von Land (b,c,d), von Jod (d) oder die Akzeptanz durch die Bevölkerung (a,c,d und Infrastruktur). Der jährliche Bedarf an Jod für die 105 H₂-MHR-Modul-Kernreaktoren liegt z.B. bei 15 % des weltweit bekannten Jodvorkommens [Anzieu 2006].

11.4.2 Zeitskala der Wasserstoffwirtschaft

Wenn die Wasserstoffwirtschaft einen Beitrag zur Lösung des Problems des Preisanstieges von Öl, der schwindenden Vorräte und der mangelnden Versorgungssicherheit leisten soll, dann muss die Wasserstoffwirtschaft viel früher etabliert sein, als dies gegenwärtig geplant ist: Verschiedene von Regierungsseiten geförderte „Roadmap“ - Dokumente benennen für die angestrebte Wasserstoffwirtschaft den Zeitraum 2040-2050, während sie tatsächlich etwa zwei Dekaden früher erforderlich zu sein scheint (also etwa 2020).

Zum Beispiel nimmt das höchste Wasserstoff-Beratungsgremium der EU – dessen Bericht einen signifikanten Beitrag zum Impetus für die derzeitige R & D Planungen der EU bezüglich Wasserstoff darstellt – an, dass nur etwa ein Drittel aller Fahrzeuge auf den Straßen der EU bis 2040 mit Wasserstoff betrieben sein wird und dass nur wenig über ein Drittel der in demselben Jahr verkauften Fahrzeuge mit Wasserstoff betrieben wird [EC 2003]. Dem kann man die Schätzungen der IEA gegenüberstellen, die schon für 2024 eine Disparität zwischen Vorrat und Bedarf an Öl in der Größenordnung der Erdölproduktion von 1997 erwarten.

Einfach gesagt, ist anzunehmen, dass der Kollaps der Ölversorgung, den die Wasserstoffwirtschaft abfedern soll, viel früher eintreten wird, als derzeit zur Kenntnis genommen wird. Die Wasserstoffwirtschaft müsste wesentlich beschleunigt werden, oder sie kommt vermutlich viel zu spät. Gleichzeitig muss die Wasserstoffwirtschaft ökonomische, sowie die Sicherheit und die Umwelt betreffende Bedenken berücksichtigen und der Versuchung widerstehen, auf emissionsreiche Wasserstoffproduktion aus fossilen Brennstoffen zurückzugreifen, ohne dass Kohlenstoff-Sequestrierung durchgeführt wird.

11.4.3 Grenzen der Verfügbarkeit von Uran

Wegen der begrenzten Uranvorkommen kann die auf der Kernspaltung beruhende nukleare Wasserstoffproduktion nicht „nachhaltig¹⁵“ sein; die Brennstofffrage verliert nur dann an Bedeutung, wenn in breitem Rahmen auf die Anwendung schneller Brüter und eine Plutonium-Wiederaufarbeitung zurückgegriffen wird.

Die Zahlen zu den Uranvorkommen variieren je nach Quelle, aber eine plausible Schätzung besagt, dass eine Gesamtmenge von etwa 4 Millionen metrischen Tonnen von Uranerz weltweit zur Verfügung steht, das für 108 €/kg oder weniger hergestellt werden kann [WEC 2001]:

- 2,96 Millionen metrische Tonnen „relativ sichere Vorkommen“ an Uranerz, und
- 0,99 Millionen metrische Tonnen „geschätzte zusätzliche Vorkommen“ (EAR-I) an Uranerz

Zu Beginn dieses Jahrzehnts wurden etwa 62.000 Tonnen Uran pro Jahr benötigt, bis 2015 wird von derselben Quelle ein Anstieg auf 79.800 Tonnen pro Jahr erwartet. Bei Zugrundelegung eines linearen Trends reichen die Uranvorkommen etwa 41 Jahre. Es wird vermutet, dass zusätzlich spekulative Vorkommen von etwa 10 Millionen Tonnen verfügbar sein könnten [WEC 2001]. Dies würde die Reichweite auf 95 Jahre erweitern.

¹⁵ Das Konzept, dass die Kernindustrie nicht nachhaltig sei, ist kaum eine radikale Aussage; vergl. z.B. [Rothwell & Van der Zwaan 2002]. Allerdings ist dieses Konzept in Widerspruch zu dem, was fast ein Glaubenssatz innerhalb der Nuklearindustrie selbst ist.

Vollständiges Rezyklieren von Plutonium durch Wiederaufbereitung und Einsatz in MOX-Brennstoff könnte diesen Zeitraum um etwa 30 % strecken, aber in vielen der derzeitigen Reaktoren kann MOX-Brennstoff nicht verwendet werden und die Erweiterung ist nicht so ausschlaggebend, da in einigen Ländern das Plutonium bereits rezykliert wird. Die Verlängerung der Ära der Kernspaltungsreaktoren durch ein vollständiges Plutonium-Recycling, ohne auf schnelle Brüterreaktoren zurückzugreifen, reicht nicht aus, um den Schluss zu widerlegen, dass die Kernspaltungstechnologie hinsichtlich der Brennstoffverfügbarkeit nicht nachhaltig ist.

Falls allerdings die Kernenergie mehr als verdoppelt würde, um dem steigenden Bedarf an Elektrizität nachzukommen (es wird erwartet, dass der Bedarf an Elektrizität sich bis 2030 verdoppeln wird; und wenn die Kernenergie ungefähr den derzeitigen Anteil an der Stromerzeugung beibehält, muss sie sich auch verdoppeln) [Biol 2004], und um die Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen, würde die Ära der Kernspaltungsreaktoren ohne schnelle Brüterreaktoren und Plutonium-Recycling in der Hälfte der genannten Zeit vorüber sein – das ist in etwa einem halben Jahrhundert. Auch in diesem Falle könnte dieser Zeitraum durch Plutonium-Rezyklierung um etwa 30 % gestreckt werden – also auf etwa 65 Jahre.

Diese Zahlen sind etwas optimistischer als jene der IAEA [IAEA 1997] und von DOE [DOE 2002b], die von einem etwas anderen Beitrag der Kernenergie zum gesamten Energieverbrauch und anderen Energieverbrauchssteigerungen ausgehen. Nach DOE würden ohne Einsatz von schnellen Reaktoren die relativ sicheren Vorkommen bis 2030, die derzeit spekulativen Vorkommen bis 2060 erschöpft sein. Andere Quellen [z.B. Matthes et al. 2005] machen noch restriktivere Angaben.

Wie immer die richtigen Zahlen lauten, diese Zeithorizonte erfüllen in keinem Fall die übliche Erwartung an Nachhaltigkeit¹⁶.

Es ist wahrscheinlich außerhalb der Nuklearindustrie weitgehend unbekannt, dass der Bedarf an Uran schon 1990 die Produktion überschritten hat. Der zusätzliche Bedarf (etwa 40 %) wurde durch Abbau von Reserven, Rezyklierung von hoch-angereichertem Uran aus früheren Waffenprogrammen, Anreicherung früherer „Rückstände“ aus dem Anreicherungsprozess und Aussonderung von Rückständen erst ab geringeren Konzentrationen an Uran-235, sowie Rezyklierung und Anreicherung von Uran aus der Wiederaufarbeitung gedeckt.

Die Kernspaltungstechnologie ist *nur* nachhaltig im Sinn von Rohstoffvorräten, wenn in relativ naher Zukunft (innerhalb 40-50 Jahren) ein Übergang zu schnellen Brüterreaktoren erfolgt. Aufgrund der bisherigen Betriebserfahrungen mit Schnellen Brütern ist es schwer zu glauben, dass schnelle Brüter rechtzeitig kommerzialisiert und hinreichend weit verbreitet sein werden, um die Wasserstoffwirtschaft in den nächsten zwei oder drei Dekaden zu unterstützen. Die einzige nukleare Alternative zur Versorgung der Wasserstoffwirtschaft mit Energie wäre eine breite An-

¹⁶ Man könnte auf die Extraktion von Uran aus Meerwasser zurückgreifen, um die Ära der Kernspaltungsreaktoren zu verlängern, aber die Kosten für die angestrebte nukleare Wasserstoffproduktion würden dann außer für kritische Bereiche (etwa Anwendungen für die Verteidigung, den Schutz der Öffentlichkeit, usw.) außerhalb der Reichweite für normale Anwendungen sein. Innerhalb der Kernindustrie wird angenommen, dass die Extraktion von Uran aus dem Meerwasser etwa das 10-fache der Gewinnung aus Uranerz kosten würde. Dies würde die Energiekosten aus Kernspaltung verdoppeln, und die Kosten der Wasserstoffproduktion mehr als verdoppeln. Die Reichweite des Urans bei Gewinnung von Uran aus Meerwasser würde wesentlich erweitert werden, schätzt doch z.B. das Uranium Information Center die zusätzlich verfügbare Menge von Uran auf rund 4.000 Millionen metrischen Tonnen [UIC 2005]. Ob die Extraktion in der Praxis möglich ist oder nicht, bleibt offen; derzeit handelt es sich um Spekulation.

wendung der Kernfusionstechnologie. Wenn sich keine dieser Technologien in großem Maßstab als machbar erweisen sollte, wäre eine andere (vermutlich erneuerbare) Energiequelle für die Wasserstoffwirtschaft erforderlich.

11.4.4 Andere Perspektiven für die Wasserstoffwirtschaft

Was immer sein Potenzial als Fahrzeug-Kraftstoff sein möge, Wasserstoff ist in Gefahr, von seinen Befürwortern als Antwort auf jede Frage angepriesen zu werden. Wasserstoff wird keinen größeren Beitrag zu Grundlastproduktion von Elektrizität liefern. Dies folgt aus der Tatsache, dass Wasserstoff mit Hilfe einer anderen Energiequelle hergestellt werden muss. Für die Erzeugung des Grundlastbedarfs ist es sinnvoller (und weit billiger und effizienter) die primären Energiequellen direkt zur Elektrizitätserzeugung einzusetzen. Hochtemperatur-Kernspaltungsreaktoren und möglicherweise zukünftige große Kernfusionskraftwerke (in 50 oder mehr Jahren, falls die Machbarkeit demonstriert werden kann) könnten eine ökonomische Wasserstoffproduktion in großem Maßstab außerhalb der Spitzenlastzeiten erlauben, so dass der Wasserstoff dann zum Lastausgleich während der Spitzenbedarfsperioden eingesetzt werden könnte. Zusätzlich könnte Wasserstoff für die Elektrizitätserzeugung in kleinem Maßstab in entfernten Regionen nützlich sein. Wenn aber kleine modulare Nuklearanlagen sich als machbar erweisen, ist auch diese Wasserstoffnutzung zur Stromerzeugung in Frage gestellt.

Die Verbrennung und Umwandlung eines Brennstoffs oder der Einsatz einer anderen Energiequelle (Uran, Wind, Solar, Wasserkraft) zur Erzeugung von Wasserstoff als Ausgangspunkt für die Elektrizitätserzeugung ist ineffizient. Es ist sehr viel effizienter die Elektrizität einfach direkt aus den Originalenergiequellen (fossile Brennstoffe, Uran, Wind, Solar, Biogas, Wasserkraft) zu erzeugen. Die Wasserstoffproduktion und Anwendung macht nur Sinn im Fall der dezentralisierten Anwendung (Transport, entfernte Bereiche, usw.) und bei Spitzenlast (Lastausgleich). Im Fall der Wasserstoffverbrennung zum Lastausgleich muss allerdings beachtet werden, dass die Anwendung von Wasserstoff nicht treibhausgasfrei ist, da der Hochtemperatur-Verbrennungsprozess Stickstoffoxide (NO_x) freisetzt. Es erscheint daher wahrscheinlicher, dass die Anwendung von Wasserstoff zum Lastausgleich durch Wasserstoffbrennstoffzellen-Kraftwerke erfolgen wird.

11.5 Umweltauswirkungen der Wasserstoffwirtschaft

In den explosionsartig zunehmenden Veröffentlichungen der letzten fünf Jahre - Artikeln, Berichten, Abhandlungen und Büchern über Wasserstoff - scheinen Fragen der Umweltauswirkungen der Wasserstoffwirtschaft im Rausch der Träume von einer treibhausgasfreien Energiewirtschaft verloren zu gehen. Erzeugung, Lagerung, Verteilung und die Anwendung von Wasserstoff habe alle Umweltauswirkungen, die systematisch untersucht werden müssen. In einigen Fällen werden die Umweltauswirkungen vermutlich ähnlich den gegenwärtig durch andere Brennstoffe verursachten Auswirkungen sein. In anderen Fällen werden die Umweltauswirkungen vielleicht weniger offensichtlich als die der existierenden Brennstoffe sein. In jedem Fall müssen die Umweltauswirkungen einer Wasserstoffwirtschaft identifiziert und systematisch ausgewertet werden, genauso wie bei jeder anderen Energietechnologie.

Im Gegensatz zu häufigen und weit verbreiteten Aussagen ist die Anwendung von Wasserstoff nicht völlig frei von Schadstofffreisetzungen. Sie sind abhängig von der Energiequelle und dem chemischen Prozess, der zur Wasserstoffproduktion verwendet wurde, von der Natur der Lage-

rungs- und Verteilungssysteme und der Endnutzung des Wasserstoffs. Wenn Wasserstoff zum Beispiel in einer Flamme verbrannt wird, entstehen Stickstoffoxide (NO_x) durch die Temperatur der Wasserstoffflamme [Solomon & Banerjee 2004: 2; Bellona 2002].

Im Fall der nuklearen Wasserstoffproduktion ergeben sich zusätzlich die bekannten Umweltaspekte, die bei jedem Kernkraftwerk, sowie bei der Urangewinnung und –verarbeitung auftreten. Besonders zu berücksichtigen sind jedoch die noch schwer abschätzbaren Umweltauswirkungen der neuen Generation von Kernkraftwerken und der Plutoniumwirtschaft. Diese Themen werden in anderen Beiträgen dieses Bandes behandelt.

11.6 Sicherheits- und Risikobetrachtungen zur Wasserstoffwirtschaft

11.6.1 Wasserstoff-BLEVEs und andere Risiken

In vielen Diskussionen zur Wasserstoffwirtschaft wird von einem „niedrigen“ Risiko gesprochen. Leider wurden die Risiken einer weit verbreiteten Wasserstoffwirtschaft jedoch noch nicht systematisch ausgewertet und werden zweifellos abhängig vom jeweiligen Konzept variieren.

Bei der Produktion, Lagerung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff in großem Maßstab tritt ein spezielles Risiko auf, das genau verstanden werden muss: Explosionen des expandierenden Dampfes einer siedenden Flüssigkeit, die in der Industrie als „BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion“ bekannt sind.

BLEVE-Phänomene können bei jedem Tank mit Flüssiggas auftreten, der aufgrund eines Brandes versagt. Im Tank erfolgt ein Druckanstieg durch das Aufheizen des Inhalts. Ein Regelventil (falls vorhanden) öffnet sich, kann aber – da es für derartige Drucktransienten nicht ausgelegt ist – bestenfalls zur Aufrechterhaltung des Drucks im Tank am Einstellwert des Ventils dienen. Wenn der Brand anhält und nicht schnell genug gelöscht werden kann, wird die Tankwand erweichen und strukturell versagen. Der Tank tendiert zu einem katastrophalen Versagen, wobei die Tankrümmer über einen großen Bereich weggeschleudert werden (bis zu mehr als einem Kilometer). Wenn das im Tank befindliche Flüssiggas brennbar ist, wird der Tankinhalt tendenziell explodieren, und dadurch zusätzlich zu dem durch BLEVE erzeugten Schaden eine Schockwelle und einen thermischen Impuls verursachen¹⁷.

Von 1950 bis 2004 wurden in Europa neun BLEVE-Unfälle mit LPG-Transporten registriert (einer auf der Schiene und die anderen acht mit LKWs) [Molag & Kruithof 2005]. BLEVE-Unfälle sind bei Flüssigwasserstofftransporten und stationären Flüssigwasserstoff-Speichertanks im Fall eines Brandes möglich.

Es gibt offensichtlich wenig öffentlich verfügbare Daten über BLEVE-Unfälle mit flüssigem Wasserstoff. Die begrenzt verfügbaren Daten über LPG-BLEVE-Unfälle weisen auf eine Unfallhäufigkeit in Tanklagern von 4×10^{-4} pro Tanklager und Jahr hin. Wenn diese Häufigkeit auch auf Flüssigwas-

¹⁷ Wie ernst die für Katastrophenschutz zuständigen Regierungsstellen die Gefahr durch Transport und Lagerung von Flüssigwasserstoff nehmen, kann man daran ermessen, dass die North American Emergency Response Guidelines (2004) eine sofortige Evakuierung in allen Richtungen bis zu einer Distanz von 1600 m empfehlen, wann immer ein Flüssigwasserstofftank an einem Brand beteiligt ist, siehe [DOT 2004].

serstofflager anwendbar ist (was gegenwärtig nicht bekannt ist), würde dies ein potenzielles Problem im Fall einer Wasserstoffproduktion in großem Maßstab unter Verwendung von Kernenergie darstellen. Geht man von dem oben genannten EU-25-Beispiel aus, würde es bei 2.373 gebauten Vier-Modul-H₂MHR-Wasserstoffproduktionsanlagen im Mittel pro Jahr einen BLEVE-Unfall an einer nuklearen Wasserstoffproduktionsanlage bedeuten.

Ein anderes potenziell wichtiges Risiko, das im Kontext einer Wasserstoffproduktion in großem Maßstab verstanden werden muss, ist das Potenzial für Unfälle im Prozess- oder Lagersystem, bei denen große Mengen an Wasserstoff in die Luft freigesetzt werden. Eine solche Freisetzung kann zu einer Explosion einer eingeschlossenen Dampfwolke führen (typischerweise aber nicht in einer gut ausgelegten Anlage, wo gegen den Einschluss von Freisetzungen Vorsorge getroffen sein muss), aber noch wahrscheinlicher zu einer Dampfwellenexplosion ohne Einschluss (UVCE: Unconfined Vapour Cloud Explosion). Solche Explosionen sind in Anlagen, die nicht der Wasserstoffherstellung dienen, aufgetreten und haben schwere Schäden verursacht (z.B. Flixborough, Großbritannien 1974)¹⁸.

Tankversagen ohne Brand sind nicht besonders selten. Die Statistik der Loss Prevention Association of India nennt Häufigkeiten von etwa $1,5 \times 10^{-3}/a$ für Niedrigtemperatur-Druckbehälter und bis zu $2,7 \times 10^{-3}/a$ für Prozessdruckbehälter [Viswanathan 2004].

Die begrenzt verfügbare Statistik über Flüssiggastankunfälle (mit und ohne Brand) deutet darauf hin, dass im Fall einer Wasserstoffproduktion in großem Maßstab mit großen Lagertanks in einer Wasserstoffwirtschaft (die von Befürwortern der Verwendung von gasgekühlten Hochtemperatur-Reaktoren zur Produktion ganz klar angestrebt wird) eine nicht-vernachlässigbare Wahrscheinlichkeit für große Explosionen besteht. Die Auswirkungen solcher Explosionen auf Strukturen, Systeme, Komponenten und das Betriebspersonal der angrenzenden Nuklearanlage wird eine sorgfältige Planung und Analyse zur Begrenzung potenzieller Risiken erfordern.

11.6.2 Die Schwachstellen der Wasserstoff-Infrastruktur

Eine Bewertung der Schwachstellen in der Infrastruktur für die Wasserstoffwirtschaft erfordert eine Definition der Struktur der Wasserstoffwirtschaft und damit Antworten auf Fragen wie z.B.:

- Wird die Wasserstoffproduktion zentralisiert oder dezentralisiert sein?
- Wenn zentralisiert, wird der Wasserstoff über Pipelines oder in großem Maßstab über die Schiene und/oder LKWs transportiert?

Betrachtet man die möglichen Sicherheits-/Terrorismusimplikationen beim Transport von Flüssigwasserstoff so würde man bei mehr als 17,500 Transporten pro Tag in der EU (350 pro Tag für Österreich) eine veritable Armee von Schutzmannschaften brauchen, nur um diese Flüssigwasserstoff-Transporte zu schützen. Und wie effektiv könnten die Schutzmannschaften gegen Terroristen sein, die einen Flüssigwasserstofftransport angreifen, wenn sie mit automatischen

¹⁸ Dieser Unfall verursachte eine Freisetzung von Zyklohexan, das sich anschließend entzündete und zu einer Explosion führte, deren äquivalente Sprengkraft unterschiedlich auf 9 bis 280 Tonnen TNT (meist zitiert mit 16 Tonnen TNT) geschätzt wurde. Eine Vielzahl leicht erreichbarer Literaturquellen liefert zusätzlich Information. (<http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/caseflixboroug74.htm>; http://en.wikipedia.org/wiki/Flixborough_disaster; http://www.icheme.org/about_icheme/medals/Venart2004.pdf).

Waffen und Panzerabwehrraketen (RPG, Rocket-Propelled Grenades) bewaffnet sind? Wie viele Schutzleute wären für jeden LKW erforderlich?

Wenn Produktion, Lagerung und Transport in großem Maßstab in einer Wasserstoffwirtschaft eingesetzt werden sollen, ist eine sorgfältige Bewertung der Schwachstellen der Infrastruktur erforderlich. Dies auch um zu verstehen, wie schwer (oder leicht) es ist, das System durch natürliche Extremereignisse oder durch von Menschen verursachte Vorfälle zu stören oder zu gefährden, wie Erdbeben und starke Winde, bzw. Sabotage und Terrorismus. Hinsichtlich des Terrors wurden bereits Bedenken bezüglich Sicherheitsschwachstellen für Benzin, LNG- und LPG-Anlagen und den entsprechenden -Transporten ausgedrückt. Diese Bedenken sind für die Lagerung von Flüssigwasserstoff und Flüssigwasserstofftransporte nicht weniger schwerwiegend¹⁹.

Das Thema der Umweltauswirkungen wird hier nicht im Detail behandelt, ist aber sicherlich eines, das detaillierte Aufmerksamkeit erfordert, sollte man sich auf den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft zubewegen. Das Thema muss zu Beginn und dann kontinuierlich weiter angesprochen werden, damit die Beachtung der Umweltauswirkungen eine der „Antriebskräfte“ der Technologie wird, anstatt bis zum letzten Schritt (der Implementierung) zu warten, bevor man sich den Umweltauswirkungen zuwendet.

11.6.3 Nukleare Risiken

Die Sicherheit (und das Risiko) einer Wasserstoffproduktion auf Kernenergie-Basis hängt vom gewählten Reaktortyp (und Leistungsniveau), der Wasserstoffproduktionsmethode, den Eigenheiten und Gefährdungen des Standorts, sowie der Nähe und dem Typ des Wasserstofflagers und/oder den verwendeten Transmissionstechnologien ab. Die mit den Kernkraftwerken an sich und dem Nuklearmüll verbundenen Risiken werden ausführlich in anderen Beiträgen dieses Bandes behandelt.

Die Kernindustrie ist sich der Notwendigkeit bewusst, eine ausreichende Trennung von Kernreaktor und Wasserstoffproduktionsanlage vorzusehen, so dass ein Unfall in der einen Anlage keine Auswirkung auf die andere hat [Forsberg & Pickard 2002]. Wenn dieser Risikoaspekt bei der nuklearen Wasserstoffproduktion zufrieden stellend behandelt wird, dann sollten keine zusätzlichen radiologischen Sicherheitsprobleme durch die nukleare Wasserstoffproduktion verglichen mit dem Betrieb von Kernkraftwerken zur Erzeugung von Elektrizität und/oder Prozesswärme auftreten. Allerdings erhöht deren dann erforderliche größere Anzahl das Gesamtrisiko.

¹⁹ Selbstverständlich stellt jede Sicherheitsbedrohung, die einen Störfall mit katastrophalem Versagen eines Flüssigwasserstofftanks unter Druck infolge eines externen Brandes auslösen kann, eine BLEVE-Gefahr dar. Eine solche Bedrohung der Sicherheit könnte die Entführung eines LKWs mit Flüssigwasserstofftanks sein, der dann in ein Zielobjekt „hohen Wertes“ gelenkt wird. Die US Armee warnt Brigade- und Bataillonskommandanten und Offiziere seit 1992 vor der Entführung von Benzintankwagen [US Army 1992].

11.7 Schlussfolgerungen

Aus den obigen Ausführungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Wasserstoff ist keine primäre Energiequelle – sondern ein Träger von Energie, der unter Verwendung einer anderen primären Energiequelle (Kernenergie, Windenergie, Photovoltaik, Biomasse, usw.) hergestellt werden muss. Energie ist für die Wasserstoffproduktion, die Komprimierung oder Verflüssigung zum Zweck der Lagerung und der Verteilung erforderlich. Die Gesamteffizienz dieser zentralisierten Wasserstoffwirtschaft ist niedrig.
- Die Wasserstoffproduktionsverfahren sind Variationen von drei Grundverfahren:

(a) Elektrolyse, (b) Dampfaufspaltung von Methan und (c) thermochemische Wasseraufspaltung. Von diesen Verfahren sind die Elektrolyse und die Dampfaufspaltung von Methan gut entwickelt. Die thermochemische Wasseraufspaltung ist trotz vier Dekaden Forschung immer noch nur im Labormaßstab möglich. Die Anwendung wird offensichtlich erhebliche Probleme durch Korrosion von Werkstoffen, sowie chemischen Gefährdungen mit sich bringen, die noch nicht systematisch erfasst worden sind.
- Die Elektrolyse und die thermochemische Wasseraufspaltung könnten durch Kernenergie betrieben werden, aber der Einsatz der gegenwärtigen Generation an Kernkraftwerken wäre nicht effizient.
- Die zentralisierte Wasserstoffproduktion in großem Maßstab, die Lagerung und die Verteilung sind mit Risiken spezifischer Typen chemischer Unfälle (BLEVE und UVCE) verbunden. Aufgrund des Ausmaßes des in Betracht gezogenen Einsatzes von Wasserstoff als Kraftstoff im Fahrzeugbereich erfordern diese Risiken eine sorgfältige probabilistische und deterministische Analyse.
- Eine dezentrale, „verbrauchsnahe“ Wasserstoffwirtschaft wird gerade erst untersucht, erscheint aber leichter an unterschiedliche Energiequellen adaptierbar zu sein und eliminiert Risiken in Zusammenhang mit BLEVE-Unfällen, die nur im Fall des Transports von Flüssigwasserstoff in großem Maßstab möglich sind²⁰.
- Die erforderliche Wasserstoffmenge zum Betrieb der leichten Personenkraftwagen in den 25-EU-Staaten liegt in der Größenordnung von 23 Millionen metrischen Tonnen pro Jahr. Das ist etwa die Hälfte der gegenwärtigen Weltproduktion.
- Die Produktion dieser Wasserstoffmenge erfordert beträchtlichen Aufwand, die Kosten würden im Bereich von 250-500 Milliarden € liegen.
- Der jährlich nur für die derzeitige Flotte leichter Fahrzeuge in den 25-EU-Staaten benötigte Wasserstoff würde größenordnungsmäßig dreiundsechzig EPR-Kernkraftwerke zur dezentralen Wasserstoffproduktion über Elektrolyse erfordern, oder etwa einhundertfünf modulare

²⁰ Das US Department of Energy hat den Entwurf eines Wasserstoff Roadmap-Berichts herausgegeben, aus dem hervorgeht, dass die dezentralisierte Produktion die brauchbarste Option zur Einführung von Wasserstoff und dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur ist [DOE 2005].

H₂-MHR-Anlagen mit benachbart angesiedelten thermochemischen Wasseraufspaltungsanlagen bei zentraler Produktion.

- Die Untersuchung der Sicherheitsimplikationen einer Wasserstoffwirtschaft, insbesondere hinsichtlich terroristischer Bedrohung, hat eben erst begonnen. Im Fall eines Transportsystems von Flüssigwasserstoff in großem Maßstab müssten Sicherheitsmaßnahmen für 6,4 Millionen Transporte von Flüssigwasserstoff pro Jahr bereitgestellt werden. Das sind über 17.500 Transporte pro Tag in der EU (in Österreich etwa 350 Transporte pro Tag) – die potenziell Sicherungsschutz erfordern.
- Die Untersuchung der Umweltprobleme im Zusammenhang mit der Wasserstoffwirtschaft läuft gerade erst an. Es ist noch viel Forschung erforderlich, um den Einfluss des in die Atmosphäre freigesetzten gasförmigen Wasserstoffs in einem Maßstab, wie er bei einer Wasserstoffwirtschaft zu erwarten ist, angemessen zu verstehen.
- Es ist derzeit schwer vorstellbar, wie Wasserstoff – nuklear oder nicht-nuklear – einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Schließung der entstehenden Energielücke leisten könnte; jedenfalls kann er keine rasche Lösung darstellen.

11.8 Literatur

ACIL 2003: ACIL Tasman Pty. Ltd & Parsons Brinckerhoff, National Hydrogen Study, Australian Department of Industry, Tourism and Resources, 2003

[http://www.industry.gov.au/assets/documents/itrinternet/Hydrogen_StudyOct200320031021120716.pdf]

Alcock et al. 2001: J. Alcock, L. Shirvill & R. Cracknell, Compilation of Existing Safety Data on Hydrogen and Comparative Fuels, Shell Global Solutions, prepared for the EU EIHP2 5th Framework Research Program (1998-2002), Contract Nr. ENK6-CT2000-00442, May 2001

[http://www.eihp.org/public/Reports/Final_Report/Sub-Task_Reports/ST5.1/Compilation-ExistingSafetyData_on_H2_and_ComparativeFuels_S..pdf]

Amos 1998: W. Amos, Costs of Storing and Transporting Hydrogen, NREL/TP-570-25106, National Renewable Energy Laboratory (Golden, CO USA), November 1998, page 33

[<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>]

Anzieu 2006: P. Anzieu, et al., Coupling a Hydrogen Production Process to a Nuclear Reactor, in Nuclear Production of Hydrogen: Third Information Exchange Meeting, Oarai, Japan, 5-7 October 2005, NEA-6112, OECD Nuclear Energy Agency (Paris), 2006

Areva 2003: Areva Press Release, 18 December 2003.

[http://www.areva.com/servlet/ContentServer?pagename=arevagroup_en %2FPressRelease %2FPressReleaseFullTemplate&cid=1069857874218]

Bellona 2002: B. Kruse, S. Grinna & C. Buch, Hydrogen: Status & Possibilities, Bellona Report Nr. 6: 2002, Bellona Foundation (Oslo), 2002

[http://www.bellona.no/data/f/0/26/97/0_9811_1/Hydrogen_6-2002.pdf]

Birol 2004: F. Birol, Power to the People: The Outlook for World Electricity Development, IAEA Bulletin 46: 1 2004

[<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull461/article3.pdf>]

Bossel et al. 2005: U. Bossel, B. Eliasson & G. Taylor, The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?, Final Report, Updated 28 February 2005

[http://www.efcf.com/reports/E02_Hydrogen_Economy_Report.pdf]

Brundtland 1987: G. Brundtland (Chairman), Our Common Future: The Report of the World Commission on Environment and Development, Report to the United Nations General Assembly, 42nd Session (New York, NY USA), 4 August 1987

[http://www.are.admin.ch/imperia/md/content/are/nachhaltigeentwicklung/brundtland_bericht.pdf?PHPSESSID=d24d89a5655442184bf989036962464e]

Buckner 2002: M. Buckner, *Regional Nuclear Energy Parks for Hydrogen Production*, Savannah River Technology Center (Aiken, SC USA), presented at the "Technical Workshop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power – Fission and Fusion" (San Diego, CA USA), 14-15 May 2002

[http://web.gat.com/hydrogen/images/pdf %20files/buckner_energy_parks.pdf]

Cadwallader & Herring 1999: L. Cadwallader & J. Herring, Safety Issues with Hydrogen as a Vehicle Fuel, INEEL/EXT-99-00522, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (Idaho Falls, ID USA), September 1999

[<http://www.inl.gov/hydrogenfuels/projects/docs/h2safetyreport.pdf>]

CIA 2006: US Central Intelligence Agency, The World Factbook, Online Version, updated 10 January 2006

[<http://www.odci.gov/cia/publications/factbook/geos/ee.html>]

Cracknell & Shirvill 2002: R. Cracknell & L. Shirvill (Shell Hydrogen), *Safety Considerations in Retailing Hydrogen*, presented at the H2NET Meeting, 12 November 2002

[[http://www.h2net.org.uk/PDFs/Safety/H2NET %20Safety.pdf](http://www.h2net.org.uk/PDFs/Safety/H2NET%20Safety.pdf)]

DOE 2002a: US Department of Energy, A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy – To 2030 and Beyond, February 2002

[http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/vision_doc.pdf]

DOE 2002b: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, December 2002, U.S.

DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum

DOE 2005a: US Department of Energy, Basic Research Needs for the Hydrogen Economy, Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage, and Use, Argonne National Laboratory, May 13-15, 2005.

DOE 2005b: US Department of Energy, Roadmap on Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy, Draft (Washington, DC USA), December 2005

[http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/roadmap_manufacturing_hydrogen_economy.pdf]

DOT 2004: US Department of Transportation (DOT), Transport Canada, Secretariat of Transport and Communications of Mexico, and Centro de Información Química para Emergencias de Argentina, 2004 Emergency Response Guidebook: A Guidebook for First Responders During the Initial Phase of a Dangerous Goods/Hazardous Materials Incident, ERG2004, 2004

[<http://hazmat.dot.gov/pubs/erg/erg2004.pdf>]

EC 2003: European Commission, Hydrogen Energy and Fuel Cells, A Vision of Our Future: Final Report of the High Level Group, EUR-20719-EN, Directorate-General for Research and Directorate-General for Energy and Transport (Brussels, Belgium), 2003

[https://www.hfpeurope.org/uploads/678/688/hydrogen-vision-report_HLG_2003_en.pdf]

EIA 2005: US Energy Information Administration, Annual Energy Review 2004, DOE/EIA-0384(2004), US Department of Energy (Washington, DC USA), August 2005

[<http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/pdf/aer.pdf>]

Euratom 2004: Euratom Supply Agency, Annual Report 2004, European Commission (Luxembourg), 2005

[<http://europa.eu.int/comm/euratom/ar/ar2004.pdf>]

EU 2005: European Union, Directorate-General Energy and Transport, Energy & Transport in Figures 2004, 2005

Forsberg 2002: C. Forsberg, *Nuclear Production of Hydrogen*, Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge, TN USA), presented at the “Technical Workshop on Large Scale Production of Hydrogen from Nuclear Power – Fission and Fusion” (San Diego, CA USA), 14-15 May 2002
[[http://web.gat.com/hydrogen/images/pdf %20files/forsberg_hydrogen.pdf](http://web.gat.com/hydrogen/images/pdf%20files/forsberg_hydrogen.pdf)]

Forsberg & Pickard 2002: C. Forsberg (Oak Ridge National Laboratory) & P. Pickard (Sandia National Laboratory), *The Advanced High Temperature Reactor: Matching Nuclear Energy Systems to Thermochemical Hydrogen Production*, presented at the American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Spring Meeting, 12 March 2002
[<http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2002/pres/113981.pdf>]

Gross et al. 1994: R. Gross, W. Otto, A. Patzelt & M. Wanner, *Liquid Hydrogen for Europe – The Linde Plant at Ingolstadt*, Reports on Science and Technology 54, 1994
[[http://www.linde-gas.com/international/web/lg/com/like/gcom30.nsf/repositorybyalias/pdf_report_ingoldstadt/\\$file/Bericht_54_g.pdf](http://www.linde-gas.com/international/web/lg/com/like/gcom30.nsf/repositorybyalias/pdf_report_ingoldstadt/$file/Bericht_54_g.pdf)]

Henderson 2004: D. Henderson (Office of Nuclear Energy, Science & Technology, US Department of Energy), *Nuclear Hydrogen Initiative Overview*, DOE Hydrogen Program Review (Philadelphia), 24 May 2004
[http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/review04/3_nhi_overview_henderson.pdf]

HFP 2005: European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform Deployment Strategy, August 2005
[https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf]

HFP 2006: European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP), *Fossil Energy: World Energy Resources*, 2006
[http://infotools.hfpeurope.org/energyinfos_e/energy/main05.html]

HSB PLC 2000: HSB Professional Loss Control (HSB PLC), Sphere Storage Risk Evaluation Refinery Co., 2000
[<http://www.cheric.org/ippage/g/ipdata/2000/07/file/ip2000-08.ppt>]

HyNet 2004: HyNet, Towards a European Hydrogen Energy Roadmap, Executive Report, 21 April 2004
[http://www.hynet.info/publications/docs/HYNET-Roadmap_Executive_Report_JUN2004.pdf]

IAEA 1997: IAEA-TECDOC-1258, “Assessment of uranium, deposit types and resources — a worldwide perspective” Proceedings of a Technical Committee Meeting organized by the International Atomic Energy Agency and the OECD Nuclear Energy Agency and held in Vienna, 10–13 June 1997

IEA 2003a: International Energy Agency (IEA), Energy Technology: Facing the Climate Challenge, Meeting of the Governing Board at the Ministerial Level (Paris), 28-29 April 2003
[<http://www.iea.org/dbtw-wpd/textbase/papers/2003/challenge.pdf>]

IEA 2003b: International Energy Agency, Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future, Paris, 2003

[http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/2050_2003.pdf]

IEA 2004a: International Energy Agency, Hydrogen and Fuel Cells. Review of National R&D Programs, Paris, 2004

IEA 2004b: International Energy Agency, Prospects for CO₂ Capture and Storage, Organisation for Economic Co-operation and Development (Paris), 2004

[<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/prospects.pdf>]

IEA 2005a: International Energy Agency, Prospects for Hydrogen and Fuel Cells. Energy Technology Analysis, Paris, 2005

IEA 2005b: International Energy Agency, Legal Aspects of Storing CO₂, Organisation for Economic Co-operation and Development (Paris), 2005

[http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/co2_legal.pdf]

Ingersoll et al. 2004: D. Ingersoll, et al., Status of Preconceptual Design of the Advanced High-Temperature Reactor (AHTR), ORNL/TM-2004/104, Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge, TN USA), May 2004

[<http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/120370.pdf>]

IRF 2004: Institut für Risikoforschung, Comparison of a Tokamak Fusion Power Plant With Possible Nuclear Fission and Nuclear Fusion Competitors in 2050, SERF-III Report, Task TW1-TRE/EFDA (Vienna, Austria), prepared for the European Fusion Development Association (EFDA), *in final editing*, planned for release in October 2004

IRF 2006: Institut für Risikoforschung, Visualizing the scale of a hydrogen economy for traffic in Europe. Internal Report

<http://www.univie.ac.at/irf>

Ivy 2004: J. Ivy, Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report, NREL/MP-560-36734, National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy (Golden, CO USA), September 2004

[<http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36734.pdf>]

LaBar et al. 2003: M. LaBar, A. Shenoy, W. Simon & E. Campbell, *Status of the GT-MHR for Electricity Production*, General Atomics (San Diego, CA USA), presented at the World Nuclear Association Annual Symposium, London, England, 3-5 September 2003

[<http://www.world-nuclear.org/sym/2003/pdf/labar.pdf>]

Ling Chan et al. 2001: Ling Chan & Partners Ltd., CH2M Hill (China) Ltd., Wong Pak Lam & Associates Ltd., Thomas Anderson & Partners Ltd., LLA Consultancy Ltd., MDA Hong Kong Ltd. & Edaw Earthasia Ltd., Environmental Impact Assessment for Proposed Headquarters and Bus Maintenance Depot in Chai Wan, prepared for the Hong Kong Special Administrative Region of The People's Republic of China – Government Information Centre, June 2001

[http://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_0602001/html/eia.htm]

Lovins 2002: A. Lovins, *FreedomCAR, Hypercar[®], and Hydrogen*, Rocky Mountain Institute, testimony before the US House of Representatives, Committee on Science, Subcommittee on Energy (Washington, DC USA), 26 June 2002

[http://www.rmi.org/images/other/Trans/T02-06_FreedomCAR.pdf]

Lovins 2003: A. Lovins, *Twenty Hydrogen Myths*, White Paper #E03-05, Rocky Mountain Institute (Snowmass, CO), Updated, 2 September 2003

[http://www.rmi.org/images/other/Energy/E03-05_20HydrogenMyths.pdf]

Lovins & Cramer 2004 A. Lovins & D. Cramer, *Hypercars[®], hydrogen, and the automotive transition*, Int. J. Vehicle Design 35: 1/2 2004

[http://www.rmi.org/images/other/Trans/T04-01_HypercarH2AutoTrans.pdf]

Matthes et al. 2005: F. Ch. Matthes und H.-J. Ziesel 2005: Sicherheit der Rohstoffversorgung – eine politische Herausforderung ?! Kurzstudie für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. Berlin Februar 2005

Matzner 2004: D. Matzner, *PBMR Project Status and the Way Ahead*, PBMR Pty. Ltd., presented at the “2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology” (Beijing, People’s Republic of China), 22-24 September 2004

[http://www.iaea.org/programmes/inis/aws/htgr/fulltext/htr2004_a04.pdf]

Molag & Kruithof 2005: M. Molag & A. Kruithof, BLEVE Prevention of a LPG Tank Vehicle or a LPG Tank Wagon, B&O-A R 2005/364, TNO (Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek), Netherlands, prepared for the Ministry of Transport, Public Works and Water Management, The Hague, Netherlands, December 2005

[<http://www.unece.org/trans/doc/2006/wp15ac1/ECE-TRANS-WP15-AC1-06-BE-inf03e.pdf>]

NAE 2004: National Academy of Engineering, *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, National Academies Press (Washington, DC USA), 2004

[<http://www.nap.edu/books/0309091632/html/228.html>]

NEA 2001: Nuclear Production of Hydrogen: The First Information Exchange Meeting, Paris, France, 2-3 October 2000, OECD Nuclear Energy Agency (Paris, France), 2001

NEA 2004: Nuclear Production of Hydrogen: Second Information Exchange Meeting, Argonne, Illinois, USA, 2-3 October 2003, NEA-5308, OECD Nuclear Energy Agency (Paris), 2003

NEA 2006: Nuclear Production of Hydrogen: Third Information Exchange Meeting, Oarai, Japan, 5-7 October 2005, NEA-6112, OECD Nuclear Energy Agency (Paris), 2006

Park 2003: C.V. Park (Idaho National Engineering Laboratory), *Next Generation Nuclear Plant (NGNP) with Hydrogen Production*, High Temperature Heat Exchanger Project Kickoff Meeting, University of Nevada - Las Vegas, Nuclear Science and Technology Group, 24 October 2003

[[http://nstg.nevada.edu/heatpresentations/Microsoft %20PowerPoint %20- %20Park.pdf](http://nstg.nevada.edu/heatpresentations/Microsoft%20PowerPoint%20-%20Park.pdf)]

Richards et al. 2005: M. Richards, et al. (General Atomics, Idaho National Laboratory, Texas A&M University, Fuji Electric & Toshiba), *H2-MHR Conceptual Designs Based on the SI Process and HTE*, presented at the “OECD Nuclear Energy Agency 3rd Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen and Second HTTR Workshop on Hydrogen Production Technologies” (JAEA, Oari, Japan), 5-7 October 2005
[http://www.nea.fr/html/science/hydro/iem3/papers/12_M_Richards_GA.pdf]

Rogner & Scott 2001: H. Rogner & D. Scott, Building Sustainable Energy Systems: The Role of Nuclear-Derived Hydrogen, in Nuclear Production of Hydrogen: The First Information Exchange Meeting, Paris, France, 2-3 October 2000, OECD Nuclear Energy Agency (Paris, France), 2001

Rothwell & Van der Zwaan 2002: G. Rothwell & B. Van der Zwaan, Is Light Water Reactor Technology Sustainable?, SIEPR Discussion Paper Nr. 02-11, Stanford Institute for Economic Policy Research, Stanford University (Stanford, CA USA), September 2002
[<http://siepr.stanford.edu/papers/pdf/02-11.pdf>]

Ryskamp 2003: J. Ryskamp (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory), *Hydrogen Production from Nuclear Energy*, presented at the IEEE Power Engineering Society meeting (Sun Valley, ID USA), 28 April 2003
[http://nuclear.inel.gov/papers-presentations/nuclear_hydrogen_3-3-03.pdf]

Schultz 2002: K. Schultz (General Atomics), *Efficient Production of Hydrogen from Nuclear Energy*, Presentation to the California Hydrogen Business Council, 27 June 2002
[[http://www.ch2bc.org/General %20Atomsics/NuclearH2-27June02.pdf](http://www.ch2bc.org/General%20Atomsics/NuclearH2-27June02.pdf)]

Shimizu et al. 2001: S. Shimizu, et al., A Study on the Thermo-Chemical IS Process, in Nuclear Production of Hydrogen: First Information Exchange Meeting, Paris, France, 2-3 October 2000, OECD Nuclear Energy Agency (Paris), 2001

Shiozawa et al. 2006: S. Shiozawa, M. Ogawa & R. Hino, Future Plan on Environmentally Friendly Hydrogen Production by Nuclear Energy, in Nuclear Production of Hydrogen: Third Information Exchange Meeting, Oarai, Japan, 5-7 October 2005, NEA-6112, OECD Nuclear Energy Agency (Paris), 2006

Simbeck & Chang 2002: E. Simbeck & E. Chang, Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways – Scoping Analysis, NREL/SR-540-32525, National Renewable Energy Laboratory (Golden, CO USA), November 2002
[<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>]

Solomon & Banerjee 2004: B.D. Solomon (Michigan Technological University) & A. Banerjee (University of Delaware), A Global Survey of Hydrogen Energy Research, Development and Policy, US Society for Ecological Economics (USSEE) Working Paper (Duluth, MN), draft manuscript, 26 April 2004
[http://www.ussee.org/working_papers/4wpssolomonhydrogen.pdf]

UIC 2005: Uranium Information Center, *Supply of Uranium*, UIC Nuclear Issues Briefing Paper Nr. 75 (Melbourne, Australia), September 2005
[<http://www.uic.com.au/nip75.htm>]

US Army 2002: US Army, *Operations in a Low-Intensity Conflict*, FM 7-98, 19 October 1992

Vinjamuri 2004: G. Vinjamuri, *Development of US-DOT Regulations for Hydrogen Transportation Systems*, Research & Special Programs Administration, US Department of Transportation (Washington, DC USA), presented at the "Panel Forum on Challenges of Hydrogen Pipeline Transmission, International Pipeline Conference and Exposition" (Calgary, Canada), 5 October 2004
[http://www.fitness4service.com/news/pdf_downloads/h2forum_pdfs/Vinjamuri-DOT.pdf]

Viswanathan 2004: S. Viswanathan (Loss Prevention Association of India Ltd.), *Risk, Modeling and Society*, TIFAC-IIASA Meet at New Delhi, India, 25-26 October 2004
[[http://www.tifac.org.in/news/eviiasa/T %20V %20Vishwanathan.ppt](http://www.tifac.org.in/news/eviiasa/T%20V%20Vishwanathan.ppt)]

WEC 2001: World Energy Council (WEC), *Survey of Energy Resources*, online version, 2001
[<http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/reports/ser/foreword.asp>]

Wikipedia 2006: Wikipedia, *Sustainability*, 7 March 2006
[<http://en.wikipedia.org/wiki/Sustainability>]

WNA 2005: World Nuclear Association, *Transport and the Hydrogen Economy*, Information Paper Nr. 70 (London, England), October 2005
[http://www.world-nuclear.org/info/printable_information_papers/inf70print.htm]

Wurster 2001: R. Wurster, *Hydrogen Activities in the European Union and Germany*, H2NET Symposium, 13 June 2001
[http://www.h2net.org.uk/PDFs/RN_2/Hydrogen_in_Europe&Germany-09JUL2001.pdf]

12 Nachhaltigkeit der Gewinnung von elektrischer Energie aus Nuklearenergie – Die rechtliche Dimension

Manfred Rotter

Oktober 2004

Inhaltsverzeichnis

12	Nachhaltigkeit der Gewinnung von elektrischer Energie aus Nuklearenergie – Die rechtliche Dimension	260
12.1	Avant propos	260
12.2	Recht und andere Normensysteme	260
12.2.1	Recht und Gesellschaft	260
12.2.2	Außerrechtliche Normensysteme	261
12.3	Die Operationalisierung des Begriffes der Nachhaltigkeit	261
12.3.1	Die Brundtland-Formel	261
12.3.2	Nachhaltigkeit als Verteilungsprinzip	262
12.3.3	Nachhaltigkeit als Verhältnismäßigkeitsgebot	263
12.3.4	Nachhaltigkeit als globales Bekenntnis	264
12.4	Das Prinzip der Nachhaltigkeit als Rechtsnorm	265
12.4.1	Das UN - Rahmenübereinkommen über Klimaänderung	265
12.4.2	Das Kyoto-Protokoll	266
12.4.3	Nachhaltigkeit im Gemeinschaftsrecht	266
12.4.4	Vorläufiger Ausblick	267
12.5	Die Genehmigung der Errichtung und die Kontrolle des Betriebes von Kernkraftwerken als Prärogativ des Einzelstaates	268
12.5.1	Das Übereinkommen über nukleare Sicherheit	268
12.5.2	Im Rahmen der EAG	269
12.6	Endlager-Regelungen	271
12.6.1	Das Gemeinsame (Abfall-) Übereinkommen	271
12.6.2	EAG-Richtlinienentwurf der EU-Kommission vom 8. September 2004	273
12.6.3	Das Limit der 10.000 Jahre und das Yucca Mountain-Urteil	274
12.7	Deutschlands Ausstieg aus der Kernenergie	275
12.8	Schlussfolgerungen	276
12.9	Zusammenfassung	276

12 Nachhaltigkeit der Gewinnung von elektrischer Energie aus Nuklearenergie – Die rechtliche Dimension

12.1 *Avant propos*

Die folgende Untersuchung erfolgt auf drei Analyseebenen. Am Beginn steht die Auseinandersetzung mit dem Begriff der Nachhaltigkeit und dem Problem seiner Konkretisierung als Bestandteil außerrechtlicher Normensysteme. Die zweite Ebene ist der Diskussion der Nachhaltigkeit innerhalb der Normenfelder des Völkerrechts und des Rechts der Europäischen Gemeinschaft gewidmet. Auf der dritten Ebene wird in Form eines Rückkoppelungsprozesses von einigen Beispielen aus dem Bestand rechtlicher Normen für die Genehmigung, den Betrieb, die Abrüstung von Kernkraftwerken und den Umgang mit strahlendem Müll auf die mangelnde Nachhaltigkeit der Gewinnung elektrischer Energie aus Nuklearenergie geschlossen.

12.2 *Recht und andere Normensysteme*

12.2.1 *Recht und Gesellschaft*

Die rechtliche Bewertung von Ausschnitten der gesellschaftlichen Wirklichkeit ist auf die Dichotomie von Recht und Unrecht beschränkt. Selbst die komplexeste Rechtsordnung besteht daher aus nichts anderem als einem hierarchisch strukturierten System von formalisierten Kriterien für „ja - nein“ und „wenn - dann“ Entscheidungen. An das Ergebnis dieser Entscheidungen werden bestimmte gesellschaftliche Konsequenzen geknüpft, die allerdings rechtlich determiniert sind. Wir sprechen von Rechtsfolgen.

Bei alledem ist zu berücksichtigen, dass Rechtsordnungen geschlossene, formale Systeme sind, die ihre eigene Erzeugung und ihre eigene Vernichtung selbst regeln [Walter 1974]¹. Mit der gesellschaftlichen Wirklichkeit sind sie durch die Rechtserzeugung und durch die Rechtsanwendung verbunden. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Prozess der Rechtserzeugung zu, weil gesellschaftliche Regelungsbedürfnisse nur durch ihn auch rechtliche Relevanz erreichen. Regelungsbedürfnisse, welche die Membran der Rechtserzeugung nicht passieren, bleiben ohne rechtliche Relevanz und seien sie - nach welcher Wertordnung auch immer - noch so unverzichtbar.

Neben der Trennung von Recht und Unrecht ist eine zweite wichtige Funktion von Rechtsordnungen die Erzeugung von Vorhersehbarkeit und damit von Sicherheit. Rechtsordnungen werden von der Erwartung aller ihrer Akteure getragen, dass sich die jeweils anderen an den in den Rechtsnormen enthaltenen Vorgaben orientieren. So gesehen stellen sie sich auch als ein wechselseitig bedingtes System von Verhaltenserwartungen dar.² Für davon abweichendes Verhalten

¹ Zu dieser Geschlossenheit des Rechtssystems vgl. Robert Walter, *Der Aufbau der Rechtsordnung*, 2. Aufl. (1974), S. 13 ff.

² Vgl. dazu insb. Niklas Luhmann, *Das Recht der Gesellschaft*, 1. Aufl. (1993); denselben, *Rechtssoziologie*, 3. Aufl. (1987), passim.

(Delikte) sind standardisierte Sanktionen vorgesehen, deren Verhängung eigenen Organen mit der Kompetenz vorbehalten ist, sie nötigenfalls auch mit Gewalt durchzusetzen. Die damit letztlich erzwingbare Allgemeingültigkeit von Rechtsnormen verleiht jenen Werten und gesellschaftlichen Zielsetzungen, welche in sie Eingang gefunden haben, erhöhte Stabilität.

12.2.2 Außerrechtliche Normensysteme

Allerdings gibt es neben Rechtsordnungen auch andere Normensysteme, die ebenfalls Verhaltenserwartungen bewirken. Dazu zählen Sitte, Moral oder sonstige gesellschaftliche Konventionen, unter die auch das hier besonders interessierende von einem breiten, wenn auch nicht unbegrenzten Konsens getragene Umweltbewusstsein fällt. Auf diesem Weg werden Teile jener Regelungsbedürfnisse erfasst, welche eben die Membran zu den Inhalten von Rechtsordnungen nicht oder noch nicht passiert haben.

Wichtig ist die Abgrenzung derartiger außerrechtlicher Normensysteme gegenüber Rechtssystemen. Zum einen differieren sie in ihrem Zustandekommen und zum anderen in der formalen Qualität der Sanktionen für abweichendes Verhalten. Rechtsordnungen werden auf dem Weg eines besonderen, formalisierten Verfahrens von dazu unangefochten gesondert legitimierten Organen erzeugt. Außerrechtliche Normensysteme entstehen auf mannigfache Weise durch gesellschaftliche Prozesse, ohne vorgegebene formalisierte Verfahren.

Sanktionen für abweichendes Verhalten sind in Rechtsordnungen typisiert und formalisiert und vor allem ist ihre Verhängung eigens legitimierten Organen vorbehalten, welchen die Kompetenz verliehen ist, die Allgemeingültigkeit der Rechtsordnung nötigenfalls mit Gewalt zu gewährleisten. Außerrechtliche Normensysteme hingegen sind nicht allgemein verbindlich. Sanktionen für abweichendes Verhalten sowohl in Form als auch Inhalt sind jenen Akteuren überlassen, die das System tragen. Dessen ungeachtet können ihre Auswirkungen für den betroffenen Akteur durchaus schwerwiegender als jene rechtlich definierter Sanktionen sein. Denken wir an die soziale Ächtung im innergesellschaftlichen und die Einschränkung wirtschaftlicher Beziehungen im internationalen Bereich.³

12.3 Die Operationalisierung des Begriffes der Nachhaltigkeit

12.3.1 Die Brundtland-Formel

Soweit ersichtlich wurde der Begriff der Nachhaltigkeit bereits zu Beginn des 18. Jhdts. in der deutschen Forstwirtschaft als Prinzip für die Nutzung der Waldbestände unter Wahrung der Interessen künftiger Generationen verwendet [Deutscher Bundestag 2004]⁴. Seine aktuelle allseits verwendete Formulierung stammt aus dem so genannten Brundtland-Bericht: „Sustainable development is a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“ [Report of the World Commission on Environment and Development 1983]⁵. Dieser im Indikativ formulierte Satz ist ohne Mühe als Postulat, als

³ Z.B. UN Satzung Art. 41.

⁴ Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, Fact Sheet 06/2004, >www.bundestag.de/bic/analysen< (eingesehen: 28.10.2004).

⁵ „Our Common Future“, Report of the World Commission on Environment and Development (Independent Expert Commission founded by the UN 1983) under the chairmanship of Gro Harlem Brundtland, UN-Doc. A/42/427, 4 August 1987, S. 54.

Imperativ und letztlich als Norm zu deuten. Damit kann jedenfalls vorerst festgehalten werden, dass die Forderung nach nachhaltiger Entwicklung dem Bereich der außerrechtlichen Normsysteme zur Erzeugung von Vorhersehbarkeit im obigen Sinne zuzurechnen ist. Sie erscheint von einem breiten Konsens auch von Entscheidungsträgern getragen, wozu sicherlich auch der weite Deutungsrahmen der vorgelegten Formulierung beigetragen hat. Bereits Aufbau und Anlage des Brundtland-Berichtes [Report of the World Commission on Environment and Development 1983]⁶ machen deutlich, dass die Forderung nach Nachhaltiger Entwicklung geradezu als Generalplan für die Gestaltung zeitgenössischer Gesellschaften verstanden wird und folglich für die unterschiedlichsten gesellschaftlichen Handlungsfelder aufzubereiten und zu konkretisieren ist. So unterstreicht auch die EU-Kommission in einem Strategiepapier für den Europäischen Rat, dass die „... nachhaltige Entwicklung ... zum Kernelement aller Politikfelder werden“ muss⁷. Insbesondere müsse bei den kommenden Überprüfungen der Gemeinsamen Politiken analysiert werden, wie diese in erhöhtem Maße zu der nachhaltigen Entwicklung beitragen können. Die in diesem Papier angesprochenen Politikfelder reichen daher von der Neuorientierung der Fischereipolitik (Zielbereich Artenschutz) bis hin zur Verbesserung der Rechtssetzungsverfahren in der EU und ihren Gemeinschaften⁸.

Kurzum, die Forderung nach nachhaltiger Entwicklung hat viele Dimensionen, die für den einzelnen Anwendungsbereich der Reduktion auf operationalisierbare Proportionen bedürfen [The International Law Ass. 2004]⁹. Der Verweis auf ihre Herkunft aus der Forstwirtschaft verdeutlicht immerhin besser als alle anderen Erklärungen das Anliegen, dem die Forderung nach Nachhaltiger Entwicklung zugeordnet ist. Vordergründig bezieht sie sich auf die Problematik der fairen Verteilung knapper Ressourcen zwischen den jetzigen und allen künftigen Generationen. Bei näherem Hinsehen erweist sich eine so verstandene Forderung nach nachhaltiger Entwicklung nur dann als erfüllbar, wenn der Verteilung eine, wie eben in der Forstwirtschaft, sich erneuernde Grundmenge von Ressourcen vorgegeben ist. Denn andernfalls stehen den einigermaßen bekannten Größenordnungen der gegebenen Generationen eine (hoffentlich) unendliche Kette künftiger Generationen virtuell gegenüber, was eine heute zu erwägende Aufteilung einer nur begrenzt verfügbaren Grundmenge von Ressourcen im Grunde genommen ad absurdum führt.

12.3.2 Nachhaltigkeit als Verteilungsprinzip

In Fokussierung auf das hier interessierende Thema erweist sich aber die Forderung nach nachhaltiger Entwicklung in der Verengung auf die Verteilungsproblematik als durchaus sinnvoll. Geht es doch primär um die sich durchaus erneuernde Ressource Globale Umwelt. Denn diese wird durch den laufenden Betrieb von Kernkraftwerken infolge der unvermeidlichen Abgabe von Strahlung an die unmittelbare Umwelt sowie die letztlich unausweichliche Endlagerung von Nuklearmüll tatsächlich, und durch die Möglichkeit massiver Störfälle potentiell geschädigt, wie an anderer Stelle ausgeführt [siehe weitere Beiträge]¹⁰. Im Übrigen zeigt sich auch im Bereich

⁶ Im englischen Original umfasst er 336 Seiten und 12 Kapitel. Thematisch reichen sie von „New Approaches to Environment and Development“ bis „Conflict as a Cause of Unsustainable Development“.

⁷ KOM(2001)264 endg., S. 7. „Nachhaltige Entwicklung in Europa für eine bessere Welt: Strategie der Europäischen Union für die nachhaltige Entwicklung“

⁸ KOM(2001)264 endg.

⁹ Das zeigt sich mit großer Deutlichkeit unter anderem auch in den Bemühungen der International Law Association, dem Prinzip der Nachhaltigkeit eine völkerrechtliche Dimension zu verleihen. Siehe The International Law Association, Report of the Seventy-First Conference (Berlin 2004), Committee on International Law on Sustainable Development, S. 566-620, Report S. 566-586.

¹⁰ Vgl. Kapitel 4,5,6.

der Nuklearwirtschaft, dass der oben angesprochene Gedanke der EU-Kommission, auch die Rechtsetzungsverfahren in die Handlungsfelder der Nachhaltigkeitspolitik einzubeziehen, so weit nicht hergeholt ist. Ein beträchtlicher Teil des Nachhaltigkeitsproblems im Bereich der Nuklearwirtschaft liegt nicht zuletzt darin, dass der gesamte dabei entstehende Regelungsbedarf nach wie vor von den einzelstaatlichen Gesetzgebern alleine, ohne nennenswerte institutionalisierte zwischenstaatliche oder gemeinschaftsrechtliche Kontrolle gedeckt wird, als würden die Auswirkungen möglicher Störfälle an den jeweiligen Staatsgrenzen halt machen.

12.3.3 Nachhaltigkeit als Verhältnismäßigkeitsgebot

Vorerst ist also festzuhalten, dass die Forderung nach Nachhaltigkeit als gesellschaftsethische Norm weitestgehendst akzeptiert und somit geeignet erscheint, als Leitlinie für die Gestaltung gesamtgesellschaftlicher Zukunft zu dienen. Allerdings kommt sie in ihrer Allgemeinheit einer Art Generalforderung gleich, die ihre normative Kraft erst in einem konkreten Bezugsrahmen zu entwickeln vermag. Ein für alle gesellschaftlichen Handlungsfelder gleichermaßen abruf- und umsetzbares Nachhaltigkeitsgebot ist nicht in Sicht. Als Handlungsanleitung für gesellschaftliches Gestalten muss sie durch zusätzliche Ausstattung mit weiteren Wert- und Zielvorstellungen angereichert werden. Dazu bedarf es vor allem einer allgemein nachvollziehbaren Konkretisierung der „needs“ der gegenwärtigen Generation als geradezu schicksalhafter Kontrast zu den „abilities“ und „needs“ künftiger Generationen. In Wahrheit stehen wir vor einem Problem, für welches wir keine schlüssigen Lösungen zur Hand haben. Alles was wir tun können ist, nach derzeit denkmöglichen Annäherungen an vielleicht mögliche Lösungen für nicht abschätzbare Zeiträume zu suchen.

So unabweislich diese Einsicht ist, so dringend ist es, zumindest *Ansätze* für das Entwickeln von plausiblen Lösungsstrategien zu entwickeln. Ein solcher Ansatz liegt im bereits dargestellten normativen Charakter des Nachhaltigkeitsprinzips. Es manifestiert ein *Sollen*, welches die künftigen Generationen in eine unauflösbare Abhängigkeit von den jeweils gegenwärtigen Generationen stellt, und zwar ohne auch nur die geringsten Ansprüche erheben zu können. Denn Forderungen kann man nur stellen, wenn man existiert. Somit erweist sich das Nachhaltigkeitsprinzip als Selbstbeschränkung *ohne* real existierende Anspruchsberechtigte.

Selbst ein derart einseitiges normatives Konstrukt bedarf der Umsetzung im Einzelfall. Für die Lösung der sich dabei ergebenden Operationalisierungsprobleme bietet sich am ehesten der Grundgedanke des Verhältnismäßigkeitsgebots an, wie er beispielsweise im Recht der Europäischen Gemeinschaft verankert ist¹¹. Dort geht es in einer vergleichbaren Situation darum, zu verhindern, dass die Europäische Gemeinschaft einzelnen EG Staaten mehr Kompetenzen abnimmt, als für die Erreichung der Gemeinschaftsziele nötig ist. Im Fall des Nachhaltigkeitsgebotes geht es darum, zu verhindern, dass die gegenwärtige Generation ein Übermaß an Ressourcen verbraucht. Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen könnte somit das Nachhaltigkeitsprinzip für den Energiebereich folgendermaßen konkretisiert werden:

Der so gering wie möglich zu haltende Energiebedarf der jetzigen Generation ist mit dem geringst möglichen Aufwand an Ressourcen und den geringst möglichen Eingriffen in die Umwelt zu gewährleisten. Nach den Grundsätzen der Kostenwahrheit und des Verursacherprinzips sind

¹¹ Art. 5 UA 3 EGV: „Die Maßnahmen der Gemeinschaft gehen nicht über das für die Erreichung der Ziele dieses Vertrages erforderliche Maß hinaus“.

die Lasten der Energiegewinnung ausschließlich von jenen Generationen zu tragen, die sich ihrer bedienen. [Fn. 54 und Argumentarium der Deutschen Bundesregierung]¹²

Der so gefundene Ausweg aus dem mehrfach dargelegten Dilemma der Operationalisierung des Nachhaltigkeitsprinzips im Energiesektor fügt sich schließlich auch nahtlos in die Zielsetzungen der EG Umweltpolitik. [Art 54 EGV]¹³

12.3.4 Nachhaltigkeit als globales Bekenntnis

Ungeachtet der hier dargelegten Schwierigkeiten, den Begriff der Nachhaltigkeit zu operationalisieren, hat er in zwei mittlerweile historisch gewordene Schlusserklärungen von Umweltkonferenzen der UN Eingang gefunden. So in der Rio Declaration on Environment and Development [UN Conference on Environment and Development, 1992]¹⁴, in welcher aus dem Prinzip der Nachhaltigkeit u.a. ein Recht der Menschen auf „a healthy and productive life in harmony with nature“ (Principle 1) abgeleitet wird. Der Umweltschutz sei ein zentrales Element der nachhaltigen Entwicklung (Principle 4). Zur Sicherung nachhaltiger Entwicklung: „States should reduce and eliminate unsustainable patterns of production and consumption and promote appropriate demographic policies“ (Principle 8). Der nächste UN-Entwicklungsgipfel in Johannesburg vom 24. August bis 4. September 2002 lief bereits unter der Bezeichnung „World Summit on Sustainable Development“ [Final Report Johannesburg Summit]¹⁵. Die dabei beschlossenen Maßnahmen lassen eine Ausrichtung der Nachhaltigkeitspolitik auf die Anhebung der weltweit untersten sozialen Niveaus in Bezug auf Sanitär-, Wasser-, Gesundheits- sowie Energieversorgung erkennen. Aktivitäten in den Bereichen Landwirtschaft, etwa zur Eindämmung der Desertifikation (Ausbreitung der Wüsten) und des Rückganges der Biodiversifikation (Artenverlust), Verbesserung der Marktzugänge für Least Developed Countries bis hin zur Schaffung bzw. Stärkung von Einrichtungen des Katastrophenschutzes runden das der Konferenz zu Grunde gelegene weite Verständnis von Nachhaltigkeit ab. Auch in Johannesburg erfolgte aber keine definitorische Eingrenzung des Begriffes der Nachhaltigkeit.

Die Schlusserklärungen bei den UN-Konferenzen haben politische und durchaus auch völkerrechtspolitische Bedeutung, sie erzeugen aber keinerlei völkerrechtliche Verbindlichkeiten. Der allgemeine wenn auch diffuse Konsens über die Unerlässlichkeit von Nachhaltigkeitspolitik wurde durch beide Konferenzen allerdings nachhaltig unter Beweis gestellt.

¹² Dazu auch unten bei Fn. 54 und das Argumentarium der Deutschen Bundesregierung zur Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit ihrem so genannten Ausstieg aus der Atomenergienutzung, >http://www.bmu.de/de/1024/js/download/b_nachhaltigkeit_kernenergie< (eingesehen: 28.10.2004).

¹³ „...umsichtige und rationelle Verwendung der natürlichen Ressourcen“ (Art. 174 EGV).

¹⁴ Annex I to the Report of the UN Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, 3-14 June 1992).

¹⁵ Siehe dazu den Final Report (inkl. Corrigendum), ><http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/documents.html>< (eingesehen: 28.10.2004).

12.4 Das Prinzip der Nachhaltigkeit als Rechtsnorm

12.4.1 Das UN - Rahmenübereinkommen über Klimaänderung

Bereits im Umfeld der oben angesprochenen Konferenz von Rio wurde das „Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen 1992“¹⁶ als multilateraler völkerrechtlicher Vertrag abgeschlossen. Es ist seit 21. März 1994 in Kraft [BGBl 414/1994]¹⁷. Soweit ersichtlich ist das Rahmenübereinkommen der erste völkerrechtliche Vertrag, welcher die Nachhaltigkeit in verschiedenen Zusammenhängen als bestimmenden Teil völkerrechtlicher Normierungen aufweist. So wird unter anderem die Fortführung der „Wirtschaft auf nachhaltige Weise“ ausdrücklich als einer der Gründe für die Notwendigkeit einer prompten und ausreichenden Reduktion anthropogener Klimastörungen angeführt¹⁸. In der breiten Vielfalt der von den Vertragsparteien übernommenen vertraglichen Verpflichtungen findet sich der Verweis auf „Nachhaltigkeit“ immer wieder als besondere Spezifikation vertraglich geforderter Maßnahmen¹⁹. Das ist vor allem auch im Zusammenhang mit den für UN-Abkommen mittlerweile durchaus üblichen Regelungen über die Beilegung von Streitigkeiten von Gewicht, wozu auch die Anrufung von Schiedsgerichten und selbst des Internationalen Gerichtshofes der UN gehören²⁰. Damit signalisieren die Vertragsparteien, dass der Begriff der Nachhaltigkeit in seiner jeweiligen Verwendung und Ausformung im Kontext des Übereinkommens für ein rechtlich geordnetes Verfahren zumindest potentiell geeignet ist.

Die oben dargelegten Probleme der Begriffskonkretisierung bleiben freilich aufrecht. In einem allfälligen Verfahren muss diese dann eben von der angesprochenen Instanz für den Bereich der ihr abverlangten Entscheidung vorgenommen werden. Wir kennen solche Vorgänge durchaus aus einzelstaatlichen Rechtsordnungen, wenn es um die Ausformung so genannter unbestimmter Gesetzesbegriffe geht²¹. Auch sei darauf verwiesen, dass die Nachhaltigkeit auch in der Präambel des Übereinkommens zwei Mal angesprochen und damit nach völkerrechtlichem Vertragsrecht in Zweifelsfällen jedenfalls als Interpretationsmaxime zu beachten ist²².

¹⁶ United Nations Framework Convention on Climate Change, 31 I.L.M. 1992, S. 851 bzw. >http://www.un.org/esa/sustdev/documents/UNCED_Docs.htm< (eingesehen: 28.10.2004).

¹⁷ BGBl. 414/1994 idF. BGBl. III 12/1999.

¹⁸ Vgl. Art. 2.

¹⁹ Art. 4.

²⁰ Art. 7-10.

²¹ Beispielsweise „Einbruch der Dunkelheit“. Siehe dazu nur Reinhold Zippelius, Juristische Methodenlehre, 6. Aufl. (1994), S. 43 f.

²² Vgl. Wiener Vertragsrechtskonvention Art. 31 Abs. 2. Zur Auslegungsrelevanz der Präambel vgl. nur Alfred Verdross/Bruno Simma, Universelles Völkerrecht, 3. Aufl. (1984), S. 492.

12.4.2 Das Kyoto-Protokoll

Noch stärker wird in dem so genannten Protokoll von Kyoto²³ auf die Nachhaltigkeit Bezug genommen, welches auf der Basis des genannten UN-Rahmenübereinkommens im Jahre 1997 von der überwiegenden Zahl seiner Vertragsparteien unterzeichnet wurde. Es enthält die quotenmäßige Festlegung der den jeweiligen Vertragsstaaten auferlegten Reduktionen der Emission von Kohlendioxid mit der bekannten Möglichkeit des Handels mit Emissionszertifikaten, was hier aber nicht weiter interessiert. Das Protokoll ist seit 12. Februar 2005 in Kraft [Art. 25]²⁴, da die Russische Föderation am 27. Oktober 2004 das parlamentarische Genehmigungsverfahren abgeschlossen hat²⁵. Nunmehr könnte auch in seinem Geltungsbereich die Nachhaltigkeit als Kriterium rechtlicher Beurteilung herangezogen werden. So wird in Art. 2 Abs. 1 die Fülle der dort vorgesehenen Maßnahmen unter den Generalzweck der Förderung „nachhaltiger Entwicklung“ gestellt, wobei in Abs. 1, lit. a ii die Verpflichtung zur Förderung „nachhaltiger Waldbewirtschaftungsmethoden“ und in Abs. 1, lit. a iii die Förderung „nachhaltiger landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen“ vorgesehen ist. Die Kontrolle der Einhaltung der einzelnen Vorschriften des Protokolls und damit eben auch der richtigen Anwendung der angesprochenen Nachhaltigkeitskriterien unterliegt der Konferenz der Vertragsparteien des Protokolls²⁶. Die Vorschriften über die Streitbeilegung des UN-Übereinkommens über Klimaänderungen, die bis hin zur Befassung des Internationalen Gerichtshofes gehen, gelten sinngemäß auch für das Protokoll. Das bedeutet, dass in beiden Verträgen sowohl die Rechtsnormen als auch geeignete Verfahren vorliegen, um die Einhaltung der Kriterien der Nachhaltigkeit in ihrem Rahmen rechtlich zu prüfen.

12.4.3 Nachhaltigkeit im Gemeinschaftsrecht

Im Recht der Europäischen Gemeinschaft findet sich die „Nachhaltigkeit“ im EGV [Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft]²⁷ an mehreren Stellen, und zwar in der oben dargestellten vollen Breite ihres Begriffsinhaltes: Zum einen im Zuge der Festschreibung der allgemeinen Ziele der Gemeinschaft in Art. 2, wo die „nachhaltige Entwicklung des Wirtschaftslebens“ zum Ziel der Errichtung der EG, der Wirtschafts- und Währungsunion sowie der Verwirklichung der in den Art. 3 und 4 aufgelisteten Zielsetzungen erhoben wird. Zum anderen wird „die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung“ in Art. 6 als Ziel der Einbeziehung der Erfordernisse des Umweltschutzes in die Festlegung und Durchführung der Gemeinschaftspolitiken definiert. Damit wird die Nachhaltige Entwicklung zu einem zentralen Bestimmungsfaktor des gemeinschaftlichen Umweltschutzes, obgleich sie weder in seinen Zielsetzungen (Art. 174) noch in den Kompetenz- und Verfahrensvorschriften zum Umweltschutz (Art. 175) ausdrücklich vorkommt. Seine Erfordernisse sind nicht bloß im engeren Bereich des klassischen Umweltrechtes, sondern in allen Tätigkeitsfeldern der Gemeinschaft entsprechend zu berücksichtigen. Die Lehre [Rudolf Streinz]²⁸ spricht dabei von einer Querschnittsmaterie.

²³ Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, ABIEG. 2002 L 130, S. 4 ff., oder 37 I.L.M. 1998, S. 22.

²⁴ Dazu bedarf es gemäß Art. 25 der Ratifikation durch mindestens 55 Signatarstaaten, von deren Territorium insgesamt 55,5 % der globalen Kohlendioxidemission ausgehen müssen.

²⁵ Am 22. bzw. 27. Oktober 2004 wurde das Kyoto-Protokoll durch das russische Unterhaus (Duma) bzw. Oberhaus ratifiziert (vgl. „Russisches Oberhaus verabschiedet Kyoto-Protokoll“, ><http://www.welt.de>< vom 27.10.2004).

²⁶ Vgl. Art. 13; die in den Art. 14 bis Art. 19 enthaltenen institutionellen Vorschriften sind nicht von Belang.

²⁷ Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft.

²⁸ Statt vieler Rudolf Streinz, Europarecht, 7. Aufl. (2005), RZ 1113 spricht von Querschnittsklausel.

Im Bereich der Dritte-Welt-Politik und der Entwicklungszusammenarbeit ist das Nachhaltigkeitsprinzip ausdrücklich als Ziel der gemeinschaftlichen Entwicklungspolitik in Art. 177 Abs. 1 verankert. Die Gemeinschaft fördert demnach „die nachhaltige wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Entwicklungsländer“.

Besonders deutlich ist die „nachhaltige Entwicklung“ in der Grundrechtscharta der EU, und zwar in Art. 37, verankert. Er lautet: „Ein hohes Umweltschutzniveau und die Verbesserung der Umweltqualität müssen in die Politiken der Union einbezogen und nach dem Grundsatz der nachhaltigen Entwicklung sichergestellt werden“. Die Grundrechtscharta ist zwar derzeit nicht Bestandteil des geltenden Gemeinschaftsrechtes, sie ist aber bei seiner Umsetzung von den Gemeinschaftsorganen als Leitlinie zu berücksichtigen und hat auch bereits maßgeblich Eingang in die Judikatur des Europäischen Gerichtshofes (EuGH)²⁹ und des Europäischen Gerichtes I. Instanz (EuG) gefunden.³⁰

Mittlerweile wurde die Grundrechtscharta in den Entwurf des Verfassungsvertrages³¹ (EU-Verfassung) als Teil II aufgenommen. Sollte die EU-Verfassung dereinst in Kraft treten, dann wird das Grundrecht auf Umweltschutz nicht nur Leitlinie, sondern geltendes und zwar subjektives Recht aller EU-BürgerInnen, allerdings nur im Rahmen der auch nach dem Entwurf des Verfassungsvertrages dürftig bleibenden Umweltkompetenzen der EG sein.³²

12.4.4 Vorläufiger Ausblick

In Abrundung dieses Abschnittes ergibt sich also folgender Befund: Das Nachhaltigkeitsprinzip ist auch ein tauglicher Inhalt von Rechtssystemen. Es gibt keine überzeugenden Hinweise, dass es als Norm des völkerrechtlichen Gewohnheitsrechtes im Sinne des Art. 38 des Statuts des Internationalen Gerichtshofes anzusehen ist. Wie die beiden angeführten völkerrechtlichen Beispiele zeigen, kann es aber sehr wohl Inhalt völkerrechtlicher Verträge und als solcher auch gerichtsfähig sein, wenn die entsprechenden Zuständigkeiten geschaffen sind.

Für die EG ist festzuhalten, dass das Nachhaltigkeitsprinzip ohne Zweifel als operativer Bestandteil des Gemeinschaftsrechtes etabliert ist. Auch wenn zurzeit³³ weder einschlägige Urteile noch Kommissions-, noch Ratsentscheidungen vorliegen, so sind die rechtlichen Voraussetzungen dafür bei Vorliegen entsprechender Sachverhalte durchaus gegeben.

Sowohl im Geltungsbereich besonderer völkerrechtlicher Verträge als auch des Gemeinschaftsrechtes ist es aber Aufgabe des erkennenden beziehungsweise des entscheidenden Organs, den Begriff der Nachhaltigkeit für den konkreten Einzelfall entsprechend aufzubereiten.

²⁹ Vgl. neben vielen nur Schlussanträge der Generalanwältin Juliane Kokott vom 14. Oktober 2004, Verb. Rs. C-387/02, C-391/02 und C-403/02, Silvio Berlusconi u. a.; noch nicht in Slg.

³⁰ Vgl. nur Rs. T-177/01, Jégo-Quéré/Kommission, Slg. 2002, II-2365 (Rz. 47), Rs. T-54/99, max.mobil Telekommunikation Service GmbH/Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Slg. 2002, II-313 (Rz. 48).

³¹ Der „Vertrag über eine Verfassung für Europa“, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften (2005), feierlich am 29. Oktober 2004 in Rom unterzeichnet, ist durch die Ablehnung seiner parlamentarischen Genehmigung durch Volksabstimmung in Frankreich (29. Mai 2005) und den Niederlanden (1. Juni 2005) gemäß seinem Art. IV-477 gescheitert, weil für sein Inkrafttreten die verfassungsmäßige Zustimmung aller EU-Staaten erforderlich ist.

³² Für den vorliegenden Analysebereich genügt der Vollständigkeit halber der Hinweis, dass die Nachhaltige Entwicklung in der künftigen EU-Verfassung im wesentlichen im dargestellten Sinne fortgeschrieben sein wird.

³³ 16. Feber 2005.

Allerdings muss bereits an dieser Stelle vor all zu großen Erwartungen gewarnt werden. Dieser Befund belegt lediglich, dass das Nachhaltigkeitsprinzip bereits zum Inhalt rechtlicher Normen gemacht wurde. Ob nun ein konkretes, als solches empfundenes Ärgernis als Verletzung des Nachhaltigkeitsprinzips streitanhängig gemacht werden kann, hängt von seiner jeweiligen Ausformung in der heranzuziehenden Rechtslage ab. Der dargestellte weite Interpretationsrahmen des Begriffes der Nachhaltigkeit eröffnet ja auch dem formalisierten Rechtserzeuger und den ihn tragenden gesellschaftlichen Kräften und nicht zuletzt auch den rechtsanwendenden Organen einen breiten gestalterischen Spielraum. Im rechtlichen Bereich im engeren Sinn steht dieser Spielraum aber nur den Rechtsanwendungsorganen zu. Man hat es mit einem vorgegebenen, dem Zugriff des Publikums oder von Streitparteien entzogenen Begriffsrahmen zu tun, dem der Sachverhalt „Kernkraftwerke“ zu subsumieren ist [zum Norm-Begriff]³⁴. Das ist der gravierende Unterschied zu einem Disput im außerrechtlichen Bereich. Denn dort versucht man mit argumentativen Mitteln vorerst seine eigene Lesart des Nachhaltigkeitsprinzips durchzusetzen, um dann die Unvereinbarkeit von Kernkraftwerken mit ihm zu behaupten.

12.5 Die Genehmigung der Errichtung und die Kontrolle des Betriebes von Kernkraftwerken als Prärogativ des Einzelstaates

12.5.1 Das Übereinkommen über nukleare Sicherheit

Im Jahre 1996, zehn Jahre nach Tschernobyl (!), ist das Übereinkommen über nukleare Sicherheit vom 20. September 1994 in Kraft getreten³⁵. Sein Ziel ist die Erreichung und Beibehaltung eines weltweit hohen Standards nuklearer Sicherheit (Art. 1). Aus der Sicht der hier anzustellenden Überlegungen ist entscheidend, dass das Übereinkommen „erneut bekräftigt, dass die Verantwortung für die nukleare Sicherheit bei dem Staat liegt, dem die Hoheitsgewalt über eine Kernanlage zukommt“³⁶. Folgerichtig wird nahezu jeder Artikel des operativen Teils mit der stereotypen Formel eingeleitet: „Jede Vertragspartei ... stellt sicher ... trifft etc.“ Die dann den Vertragsparteien auferlegten Pflichten sind von derart allgemeiner Selbstverständlichkeit, dass sie mehr als 50 Jahre nach der Inbetriebnahme der ersten Kernkraftwerke mit Sicherheit von nahezu allen Vertragsparteien bei Abschluss des Übereinkommens bereits erfüllt waren³⁷. Wie die vom Übereinkommen geforderten Sicherheitsstandards von den Vertragsparteien zu gewährleisten sind, wird diesen überlassen. Dabei wird gelegentlich auch auf die einzelstaatlich festgelegten Standards verwiesen. So schreibt Art. 14 vor, dass der Betrieb von Kernkraftwerken laufend darauf zu kontrollieren ist, dass die „innerstaatlichen Sicherheitsanforderungen ... und betrieblichen Grenzwerte“ eingehalten werden. Auch beim Schutz der Bediensteten und der Öffentlichkeit gegen Strahlenbelastungen durch den Betrieb eines Kernkraftwerks wird auf die innerstaatlichen Grenzwerte verwiesen (Art. 15). All das sind keine redaktionellen Versehen, sondern die erklärte Linie des Übereinkommens. In der Präambel (Pt. viii) heißt es dazu, dass „dieses Übereinkommen eine Verpflichtung zur Anwendung von Grundsätzen der Sicherheit für Kernanlagen und

³⁴ Dabei macht es keinen Unterschied, ob die Norm im eigentlichen Sinn des Wortes „selbstverständlich“ ist, oder vom anwendenden Organ erst aufbereitet werden muss. In beiden Fällen ist sie dem Zugriff des Akteurs entzogen.

³⁵ Hier zitiert nach BGBl. III 39/1998 bzw. ABIEG 1999 L 318, S. 20. Obgleich die Internationale Atomenergie-Organisation die Schirmherrschaft über das Abkommen ausübt, ist es kein IAEA-Abkommen im engeren Sinn des Wortes.

³⁶ Präambel Pt. iii.

³⁷ Andernfalls wäre es wohl auch gar nicht zustande gekommen.

nicht so sehr von Sicherheitsanforderungen im einzelnen schafft“. Offenbar zur Beruhigung wird dann weiters ohne nähere Spezifikation darauf verwiesen, dass es „international ausgearbeitete Sicherheitsrichtlinien“ gebe, die von Zeit zu Zeit auf den neuesten Stand gebracht werden. All dies wäre ja tolerabel, würde das Übereinkommen ein Aufsichtsorgan schaffen, welches die allgemein gehaltenen Sicherheitserfordernisse im Einzelfall zu konkretisieren hätte. So ist es aber nicht. Die Kontrolle der Einhaltung des Übereinkommens liegt in den Händen einer Konferenz der Vertragsstaaten, die im Konsens zu entscheiden hat³⁸. Alles in allem haben es die KKW-Staaten durchaus verstanden, sich die Exklusivkompetenz für die Erfüllung des Regelungsbedarfes ihrer Nuklearindustrie zu sichern.

Naturgemäß muss auch das Übereinkommen die Möglichkeit von Unfällen berücksichtigen. In Art. 18 heißt es dazu, dass die Vertragsparteien für die Auslegung und den Bau eines Kernkraftwerks geeignete Maßnahmen treffen, „um Unfälle zu vermeiden und falls sie eintreten, ihre strahlungsbedingten Folgen zu mindern“.

12.5.2 Im Rahmen der EAG

Im Geltungsbereich der Europäischen Atomgemeinschaft (EAG) sieht es ähnlich, wenn auch ein wenig differenzierter aus. Festzuhalten ist, dass es noch immer keine gemeinschaftsweite, alle 25 Mitgliedstaaten gleichermaßen bindende Standardisierung des Regelungsbedarfes für die Nuklearindustrie gibt. Lediglich die zehn neuen Gemeinschaftsmitglieder mussten sich als Teil der Bedingungen ihrer Aufnahme einer – wenn auch eingeschränkten – Kontrolle ihrer bestehenden Kernkraftwerke durch die EU-Kommission im Auftrag des Europäischen Rates [Schlussfolgerungen des Europäischen Rates Köln/Helsinki 1999]³⁹ unterwerfen.

Der Duktus des Erweiterungsverfahrens erzwang nämlich die bislang sorgsam vermiedene Elevation der KKW-Sicherheit auf die Gemeinschaftsebene. Soweit ersichtlich, war es nach Vorarbeiten des Rates während der österreichischen Präsidentschaft⁴⁰ der Gipfel von Köln, auf welchem die Anhebung der Sicherheitsstandards für Kernkraftwerke in den Beitrittsstaaten auf europäisches Niveau erstmals erwogen wurde: „Der Europäische Rat betont die Bedeutung hoher Sicherheitsstandards im Nuklearbereich in Mittel- und Osteuropa“⁴¹. Weiters wurde die Kommission beauftragt, in ihren „Fortschrittsberichten“ über die Anwendung hoher Sicherheitsstandards in den Mittel- und Osteuropäischen Ländern zu wachen. Fortan entwickelte das Thema der KKW-Sicherheit im Verbund des Erweiterungsprozesses eine eigene Dynamik, von der nicht zuletzt auch der Konflikt zwischen der Tschechischen Republik und Österreich wegen des KKW Temelín getragen war und immer noch ist.

War die Sorge der Union um die KKW-Sicherheit bis dahin auf die Nuklearindustrie in den Beitrittsstaaten beschränkt, so hat sie der Europäische Rat von Laeken auch auf die „mächtige

³⁸ Art. 22 - Art. 25.

³⁹ „Der Europäische Rat ... ruft die Kommission dazu auf, diese Angelegenheit in ihren nächsten regelmäßigen Berichten über die von den beitragswilligen Ländern erzielten Fortschritte, die im Herbst 1999 vorzulegen sind, eingehend zu prüfen“ (Rz. 60 der Schlussfolgerungen des Europäischen Rates von Köln v. 3./4. Juni 1999). Siehe dazu weiters die Schlussfolgerungen des Europäischen Rates von Helsinki v. 10./11. Dezember 1999, Rz. 7.

⁴⁰ Am 24.9.1998 weist der Rat in seinen Schlussfolgerungen zur Erweiterung und zur Umwelt (Bull.EU 9/1998, Pt. 1.3.63) darauf hin, „dass die nukleare Sicherheit in den beitragswilligen Ländern verbessert werden muss, sodass ein Niveau erreicht wird, das dem Stand in der Union hinsichtlich der Technologie und der Vorschriften sowie in operativer Hinsicht entspricht“.

⁴¹ Europäischer Rat von Köln am 3./4.6.1999, Schlussfolgerungen des Vorsitizes, Bull.EU 6/1999, Pt. 1.23.60.

Kernindustrie⁴⁴² der Union erstreckt: „Der Europäische Rat sagt zu, in der Union auch weiterhin ein hohes Maß an nuklearer Sicherheit zu gewährleisten. Er betont mit Nachdruck, dass Schutz und Sicherheit von Kernkraftwerken überwacht werden müssen. Er bittet um die regelmäßige Vorlage von Berichten der Atomexperten der Mitgliedstaaten, die in engem Kontakt mit der Kommission bleiben werden“⁴⁴³. Die darauf hin einsetzenden umfangreichen legislativen Bemühungen der EU-Kommission, für alle EU-Staaten gleiche Standards für die KKW-Sicherheit in Form von zwei Richtlinienentwürfen für den Rat der EU zu schaffen⁴⁴ sind vorerst gescheitert. Inhaltlich sollte man sich auch im nachhinein keine Wunder erwarten. Der Vorschlag der Kommission für eine „Richtlinie (Euratom) zur Festlegung grundlegender Verpflichtungen und allgemeiner Grundsätze im Bereich der Sicherheit kerntechnischer Anlagen“⁴⁴⁵ hat den dargestellten Standard des „Übereinkommens über die nukleare Sicherheit“ inhaltlich nicht übertroffen. Die „mächtige Kernindustrie“ kann sich entspannen.

Immerhin sind zwei Elemente hervorzuheben. Zum einen bezog sich der Entwurf ausdrücklich auch auf die Stilllegung von Kernkraftwerken (Art. 4). Naturgemäß waren die nuklearrechtlichen Implikationen einer Stilllegung bei den bestehenden Normen des Strahlenschutzes immer implizit miterfasst, aber nicht ausdrücklich als eigener Regelungsbereich angesprochen. Nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund der praktischen Erfordernisse der Stilllegung einiger Kernkraftwerke in den Beitrittsstaaten hat sich die Kommission auch der finanziellen Seite dieses Problems angenommen und verlangt Vorkehrungen für entsprechende Finanzierungen z.B. durch Einrichtung geeigneter Fonds (Art. 9 Abs. 2 RL-V mit detailliertem Anhang). Die Gesamtkosten einer Stilllegung einschließlich der Sanierung des Standortes werden auf 15 % der Gesamtinvestitionskosten pro Reaktor geschätzt, was in absoluten Zahlen Größenordnungen von 200 Millionen bis 1 Mrd. Euro bedeutet.⁴⁶

Zum anderen werden die nationalen Regelungs- und Kontrollbehörden im Vorschlag der Aufsicht durch die Kommission unterstellt (Art. 12). Diese setzt dafür einen Ausschuss aus Experten der Mitgliedstaaten ein, was ihr die Errichtung eigener Fach - Strukturen erspart. Das wäre ein beachtlicher prozeduraler Fortschritt gewesen, auch wenn die primäre Kontrolle der immer noch nationalen Sicherheitsstandards bei den nationalen Behörden geblieben wäre. Die uneingeschränkte Exklusivität der nationalen Behörden wäre jedenfalls gebrochen gewesen.

Entscheidend wäre aber vor allem die Chance gewesen, dadurch die Fragen der KKW-Sicherheit auf der Ebene des Gemeinschaftsrechtes gerichtsfähig zu machen.

Nunmehr legt die Kommission abermals zwei Richtlinienentwürfe vor. Hier interessiert vorerst der Richtlinienentwurf über die Sicherheit kerntechnischer Anlagen⁴⁷. Er ist nun vollends auf die dargestellte schlichte Regelungsdichte des Übereinkommens über die nukleare Sicherheit

⁴² Den geistigen Proportionen ihres Gründungsjahres 1957 entsprechend, war es eines der Ziele der EAG, „die Voraussetzungen für die Entwicklung einer mächtigen Kernindustrie zu schaffen“ (Präambel 4. Abs.).

⁴³ Europäischer Rat von Laeken am 14./15.12.2001, Schlussfolgerungen des Vorsitzes, Rz. 59.

⁴⁴ Dazu im einzelnen Manfred Rotter, Nukleare Sicherheit in der Europäischen Union, in Christian Callies (Hrsg.), Der Konventsentwurf für eine EU-Verfassung im Kontext der Erweiterung: Vorträge des Dritten Österreichischen Europarechtstages am 12./13. September in Graz, veranstaltet vom Institut für Europarecht der Karl-Franzens-Universität Graz, 1. Aufl. (2004).

⁴⁵ KOM(2003)32 endg. Auf den im selben KOM-Dok vorgelegten Entwurf einer Richtlinie sei hier nur verwiesen, aber nicht näher eingegangen.

⁴⁶ KOM(2002)605 endg., S. 2 f.

⁴⁷ Geänderter Vorschlag für eine Richtlinie (Euratom) des Rates zur Festlegung grundlegender Verpflichtungen und allgemeiner Grundsätze im Bereich der Sicherheit kerntechnischer Anlagen, KOM(2004)526 endg.

reduziert. Der Hinweis auf die ernste Problematik der Stilllegung und Abrüstung altersschwacher Kernkraftwerke wurde ebenso eliminiert wie die Kontrolle der Tätigkeit der nationalen nuklearen Kontrollbehörden. Was diesbezüglich bleibt, ist wie im Übereinkommen über die nukleare Sicherheit eine Berichtspflicht der Mitgliedstaaten an die EU-Kommission. Zur Beurteilung der einlangenden Berichte bedient sich die EU-Kommission ihrerseits eines Expertengremiums, welches seinerseits aus Vertretern der nationalen Kontrollbehörden besteht. Besondere Kompetenzen zu Interventionen, welcher Art immer sie sind, werden der EU-Kommission nicht eingeräumt. Die vage Möglichkeit einer Zuständigkeit des EuGH für allfällige Verfahren wegen Verletzung der Richtlinie bleibt allerdings bestehen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die KKW-Staaten im wesentlichen ihre Exklusivkompetenz hinsichtlich der Regelung der Nuklearindustrie behaupten konnten. Die im Übereinkommen über nukleare Sicherheit aufgestellten Sicherheitserfordernisse sind allgemeiner, um nicht zu sagen selbstverständlicher Natur. Sie enthalten keinerlei quantifizierbare oder sonst wie bestimmte Eckdaten, die bei der Beurteilung der Sicherheitslage von Kernkraftwerken auch nur ein Mindestmaß an Nachvollziehbarkeit gewährleisten würden. Der erste durchaus respektable Versuch der EU-Kommission, die Sicherheitsfrage aller Kernkraftwerke auf dem Territorium der EAG auf die Gemeinschaftsebene zu bringen, ist gescheitert. Die Erfolgchancen des zweiten wesentlich mildereren Ansatzes in diese Richtung sind einstweilen ungewiss.

12.6 Endlager-Regelungen

Die chemischen und physikalischen Erfordernisse der so genannten Endlagerung abgebrannter Brennstäbe und sonstiger hochaktiver Abfälle der Nutzung der Kernenergie auf nationaler, zwischenstaatlicher und der Ebene der EU und ihrer Gemeinschaften werden durchaus zur Kenntnis genommen. Das Auflisten wissenschaftlicher Erkenntnisse ist jedoch eine Sache, das Erarbeiten des rechtlichen Regelwerkes, das Schaffen und Finanzieren von Institutionen zur Bewältigung der daraus abzuleitenden organisatorischen Notwendigkeiten eine andere.

12.6.1 Das Gemeinsame (Abfall-) Übereinkommen

Unter der Schirmherrschaft der IAEO wurde auch zu diesem wichtigen Aspekt der Nuklearindustrie ein multilateraler völkerrechtlicher Vertrag ausgearbeitet⁴⁸. Darin werden zwei Regelungsbereiche unterschieden, nämlich die Behandlung abgebrannter Brennelemente (Art. 4 bis 10) und die Behandlung radioaktiver Abfälle (Art. 11 bis 17). Daran schließen sich dann beiden Teilen gemeinsame Regelungen und einige dürftige Überprüfungsvorkehrungen an⁴⁹. Innerhalb der beiden Hauptregelungsbereiche wird wiederum zwischen Anlagen zur Behandlung der abgebrannten Brennstäbe bzw. der radioaktiven Abfälle und Endlager unterschieden. Die Anlagen für die Behandlung der abgebrannten Brennstäbe und der radioaktiven Abfälle werden analog von Kernkraftwerken mit vergleichsweise hoher Regelungsintensität erfasst, während der Regelungsbedarf von Endlagern nur marginal abgehandelt wird. Nun ist es zwar einsichtig, dass

⁴⁸ „Gemeinsames Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“, BGBl. III 169/2001 bzw. ><http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/jointconv.html>< (eingesehen: 28.10.2004).

⁴⁹ Sie entsprechen im wesentlichen dem Muster des Übereinkommens über nukleare Sicherheit.

Endlager [Art. 2 lit. l]⁵⁰ keiner besonders differenzierten Regeln für ihren Betrieb [Art. 2 lit. k]⁵¹ bedürfen, weil ein solcher ja nach ihrem Verschluss begrifflich ebenso ausgeschlossen ist, wie ihre Stilllegung. Gerade aber wegen ihrer Endgültigkeit stellt sich der Regelungsbedarf für Endlager aber um so mehr für ihre Errichtung und Beschickung. Dem wird aber keineswegs Rechnung getragen, wie gleich zu zeigen ist.

Wie schon das oben besprochene Übereinkommen über nukleare Sicherheit, so geht auch dieses Übereinkommen davon aus, dass jeder Staat, auf dessen Territorium sich eine Kernanlage befindet, für alle erdenklichen Erfordernisse zur Behandlung von Nuklearabfällen und abgebrannten Brennelementen selbst zu sorgen hat. Das reicht von der Verpflichtung zur Aufstellung entsprechender Sicherheitsstandards im Rahmen der nationalen Rechtsordnungen (Art. 18 und 19) über die Errichtung entsprechender staatlicher Kontrollinstanzen (Art. 20) bis zur Bereitstellung von Personal- und Finanzmitteln (Art. 22) sowie Strahlenschutz (Art. 24), um nur die wichtigsten zu erwähnen. Konkrete Sicherheitsvorgaben in Form von Grenzwerten von der zwischenstaatlichen Ebene werden ausdrücklich vermieden. Auch hier wird diesbezüglich lediglich auf die Notwendigkeit der gebührenden Berücksichtigung nicht näher definierter „international anerkannter Kriterien und Normen“ (Art. 4 Abs. 2 lit. iv) verwiesen.

Es ist sicherlich eine gute Idee, dass bei der Konzeption von Endlagern jedenfalls auch schon die Vorschriften für ihren Verschluss auszuarbeiten sind (Art. 14 lit. iii). Es ist auch sinnvoll, für den Bau eines Endlagers darüber hinaus „eine systematische Sicherheitsbewertung und die Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt“ vorzunehmen und deren Ergebnisse „anhand der von der staatlichen Stelle festgelegten Kriterien“ zu bewerten⁵². Aber wie schon oben bei der Darstellung des Übereinkommens über die nukleare Sicherheit, so zeigt sich auch hier, dass das Hauptanliegen der Autoren des Vertragstextes vornehmlich darauf gerichtet war, den Nuklearstaaten die volle Autonomie für die Gestaltung ihres Umganges mit abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen einschließlich der Endlager Problematik zu belassen. Besonders deutlich wird dies in dem Detail, dass die nähere Darstellung der eigentlichen Implikationen des „Verschlusses“ eines Endlagers in die Begriffsbestimmung des Art. 2 lit. t verlagert wird, ohne dass darauf bei der Ausgestaltung der Vorschriften über das Endlager gebührend eingegangen wird. Dort heißt es: „Verschluss ist die Beendigung aller betrieblichen Tätigkeiten zu irgendeinem Zeitpunkt nach der Einlagerung abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einem Endlager. Darin eingeschlossen sind die abschließenden technischen oder sonstigen Arbeiten, die erforderlich sind, um die Anlage in einen langfristig sicheren Zustand zu versetzen“. Welche Schritte dabei im einzelnen zu setzen sind und um welche Fristen es dabei zu gehen hat, bleibt sowohl bei der Begriffsbestimmung als auch in den weiteren Regelungen des Übereinkommens offen.

Dennoch wird in Art. 22 lit. iii vorgeschrieben, „dass finanzielle Vorsorge getroffen wird, um die Fortführung der entsprechenden behördlichen Kontrollen und Überwachungsmaßnahmen während des für erforderlich gehaltenen Zeitraumes nach dem Verschluss eines Endlagers zu ermöglichen“.

⁵⁰ Nach Art. 2 lit. i bedeutet „Endlagerung“ die Einlagerung abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einer geeigneten Anlage, wobei eine Rückholung nicht beabsichtigt ist. Nach Art. 2 lit. n bedeutet „Lagerung“ das Aufbewahren abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle in einer Anlage, in der für ihren Einschluss gesorgt wird, wobei eine Rückholung beabsichtigt ist.

⁵¹ Nach Art. 2 lit. k bedeutet „betriebliche Lebensdauer“ den Zeitraum, in dem eine Anlage zur Behandlung abgebrannter Brennelemente oder radioaktiver Abfälle bestimmungsgemäß genutzt wird. Bei einem Endlager beginnt dieser Zeitraum mit der ersten Einlagerung der abgebrannten Brennstäbe und radioaktiven Abfälle in der Anlage und endet mit dem Verschluss der Anlage.

⁵² Art. 15 lit. ii.

Alles in allem belegt das Übereinkommen in all seinen Details die strukturelle Ratlosigkeit der Vertragsstaaten, wie mit den abgebrannten Brennelementen und den radioaktiven Abfällen tatsächlich umgegangen werden soll. Es ist eine Sache, zu erkennen, dass an ihrer Endlagerung letztlich kein Weg vorbeiführt, sieht man von der Möglichkeit der Wiederaufbereitung von abgebrannten Brennstäben ab⁵³, was aber das Problem nur verschiebt und obendrein neue schafft. Es ist eine ganz andere Sache, physikalisch geeignete und auch gesellschaftlich verträgliche Lagerstätten zu finden. Die im Übereinkommen aufgestellte Verpflichtung, oder ist es nur ein Appell, sie mögen sich bemühen, „Handlungen zu vermeiden, deren vernünftigerweise vorhersehbare Auswirkungen auf künftige Generationen größer sind als die für die heutige Generation zulässigen, um zu versuchen, künftigen Generationen keine unangemessenen Belastungen aufzubürden“ [Art. 4, Abs. 2]⁵⁴, belegt diese Ratlosigkeit. Denn dieser Appell zur Nachhaltigkeit⁵⁵ macht nur Sinn, wenn noch ausreichend Entscheidungsspielraum besteht, was aber nicht der Fall ist. Der eher unorganische Verweis auf die Nachhaltigkeit nährt in diesem Zusammenhang den Verdacht, dass es sich dabei vor allem um ein populistisches Lippenbekenntnis handelt.

12.6.2 EAG-Richtlinienentwurf der EU-Kommission vom 8. September 2004

Dieser geänderte Vorschlag für eine Richtlinie (Euratom) des Rates über die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle⁵⁶ geht über das eben behandelte Übereinkommen nicht hinaus. Die EU-Kommission versucht nicht einmal, der höheren Integrationsdichte der EAG mit ihren 25 Mitgliedstaaten mit einer höheren Regelungs- und Kontrollkomplexität Rechnung zu tragen, als sie im (Abfall-) Übereinkommen für eine offene Grundmenge von Vertragsstaaten ohne gemeinsamen institutionellen Rahmen vorgesehen ist. Das heißt, dass selbst im Rahmen einer hoch integrierten Internationalen Organisation wie der EAG die KKW-Staaten von der EU-Kommission in ihrer uneingeschränkten Gestaltungsautonomie unangefochten belassen bleiben.

Auch die Kommission geht davon aus, dass es keine Alternative zur Endlagerung gibt⁵⁷. Es wird den Mitgliedstaaten überlassen, die Möglichkeiten einer Endlagerung in tiefen geologischen Schichten vorzusehen und dabei ihre spezifische Situation zu berücksichtigen (Art. 4 Abs. 1 UA 2). Die Mitgliedstaaten werden angehalten, eine entsprechend hohe Transparenz ihrer Entscheidungen über Lagerstätten und Endlagerstätten⁵⁸ gegenüber ihrer Bevölkerung zu schaffen, vor allem soweit sie von Störfällen betroffen sein könnte (Art. 3 Abs. 5). Entsprechende Zeitpläne sollen eine geordnete Lösung der Abfallprobleme unterstützen und ordnen (Art. 5). Zur überaus oberflächlichen Kontrolle wird ausdrücklich das gleiche Berichtssystem mit einem Ausschuss von Experten der Mitgliedstaaten geschaffen (Art. 7 und 8) wie schon im (Abfall-) Übereinkommen. Alles in allem ist das Bemühen der EU-Kommission unübersehbar, den Mitgliedstaaten nicht mehr Pflichten abzuverlangen, als sie ohnehin schon im (Abfall-) Übereinkommen eingegangen sind.

⁵³ Präambel Pt. vii.

⁵⁴ Art. 4, Abs. 2, lit. vi und vii sowie wortident Art. 11 lit. vi und vii.

⁵⁵ Dazu auch oben bei Fn. 11.

⁵⁶ Geänderter Vorschlag für eine Richtlinie (Euratom) des Rates über die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, KOM(2004)526 endg.

⁵⁷ Erwägungsgrund 17.

⁵⁸ Die Definitionen entsprechen jenen des (Abfall-) Übereinkommens.

12.6.3 Das Limit der 10.000 Jahre und das Yucca Mountain-Urteil

Die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD⁵⁹ und die (deutsche) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS)⁶⁰ haben jeweils eine Sammlung nationaler Rechtsvorschriften über die Gestaltung von Endlagern zusammengestellt [NEA/RWM/RF(2004)1]⁶¹, deren Darstellung und Analyse hier im einzelnen entbehrlich ist. Den meisten Regelungen ist gemeinsam, dass die Kontrolle der sicheren Verwahrung hochstrahlender Nuklearabfälle in Endlagern für einen Zeitraum von 10.000 Jahren vorzusehen ist [(RFS) III.2.f; SKIFS 2002: 1]⁶². Auch die EU-Kommission geht in einer entsprechenden Empfehlung von dem selben Zeit- und Kontrollhorizont aus⁶³.

Diese zeitliche Limitierung erweist sich aber bei näherem Hinsehen als willkürliche Annahme. Denn allein das unter anderem zu deponierende Element Neptunium-237 hat eine Halbwertszeit von mehr als 2 Millionen Jahren und das ebenfalls zu deponierende Jod-129 eine solche von gar 16 Millionen Jahren.

All dies ist im Yucca Mountain-Disput in Form eines Rechtsmittelurteils (zweite Instanz) des United States Court of Appeals für den District of Columbia Circuit vom 9. Juli 2004 (Yucca Mountain-Urteil)⁶⁴ gerichtsnotorisch geworden. Der Yucca Mountain ist ein Bergmassiv im US-Bundesstaat Nevada⁶⁵, welches als Endlagerstätte für hochstrahlende Nuklearabfälle für das gesamte US-Bundesgebiet (bis inklusive 2003 ein Volumen von 49.000 Tonnen) vorgesehen ist. Aus der Fülle der vom Gericht behandelten Rechtsfragen interessiert hier vor allem die Festlegung der kontrollierten Laufzeit der Lagerstätte und ihrer Einrichtungen auf 10.000 Jahre durch die Environmental Protection Agency (EPA), einer US-Bundesbehörde. Gemäß der von ihr dazu vorgegebenen gesetzlichen Richtlinien⁶⁶, hatte sich die EPA an die Expertise der National Academy of Science (NAS) zu halten. Unter Laufzeit⁶⁷ ist dabei jene Periode zu verstehen, innerhalb der die natürlichen und organisatorischen Eigenschaften der Lagerstätte gewährleisten, dass die einer in einem definierten Umkreis der Lagerstätte lebenden virtuellen Person zumutbare Strahlung nicht überschritten wird. Die NAS hat dafür einen Zeitraum verlangt, der jedenfalls über den Höhepunkt der Strahlungsintensität hinauszugehen hat. Die EPA hat sich bewusst über die diesbezüglichen Vorgaben der NAS hinweggesetzt. Eines ihrer Argumente war unter anderem, dass es wenig Sinn mache, institutionelle Planungen über einen Zeitraum von 10.000 Jahren hinaus vorzunehmen. Aus diesen hier sehr vereinfacht dargestellten Gründen ist das Gericht schließlich

⁵⁹ Genau genommen das „Radioactive Waste Management Committee“ der NEA.

⁶⁰ Im Auftrag des (deutschen) Bundesamts für Strahlenschutz (BfS).

⁶¹ „The Regulatory Control of Radioactive Waste Management - Overview of 15 NEA Member Countries“, NEA/RWM/RF(2004)1, 13.02.2004, ><http://www.nea.fr/html/rwm/docs/2004><; und „Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen“, GRS-A-2834, Jänner 2001, >http://www.akend.de/aktuell/berichte/berichte_an_akend.htm< (eingesehen: 28.10.2004).

⁶² Vgl. nur in Frankreich die „Règle fondamentale de sûreté (RFS) III.2.f.“ der L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN); oder in Schweden „The Swedish Nuclear Power Inspectorate's Regulations concerning Safety in connection with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear Waste“, SKIFS 2002: 1, ><http://www.ski.se/page/5/22.html?29044>< (eingesehen: 28.10.2004).

⁶³ Endlagerung radioaktiver Abfälle - Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers, Serie „Euradwaste“ Nr. 6, EUR 14598, 1992.

⁶⁴ Opinion No. 01-1258, ><http://pacer.cadc.uscourts.gov/docs/common/opinions/200407/01-1258a.pdf>< (eingesehen: 28.10.2004). Die zitierten Angaben über Halbwertszeiten und Gesamtmenge des bisher angefallenen Nuklearabfalls aus US-KKW finden sich auf S. 6 des Urteils.

⁶⁵ Etwa 150 km nordwestlich von Las Vegas.

⁶⁶ Vor allem Energy Policy Act of 1992, H.R.776, Pub. L. 102-486.

⁶⁷ Im englischen „compliance time“.

zu dem Ergebnis gekommen: „In sum, because EPA’s chosen compliance period sharply differs from NAS’s findings and recommendations, it represents an unreasonable construction of section 801(a) of the Energy Policy Act“⁶⁸.

Diese Entscheidung ist für die EPA und die anderen befassten US-Bundesbehörden, vor allem aber für die US-Nuklearindustrie ein schwerer Rückschlag. Dennoch wurde auf die ursprünglich geplante [Yucca Mountain Project]⁶⁹ Anrufung des US-Supreme Courts verzichtet. Das Yucca Mountain-Urteil des United States Court of Appeals für den District of Columbia Circuit vom 9. Juli 2004 ist daher rechtskräftig.

Für die hier anzustellenden Überlegungen ist es deswegen von größter Bedeutung, weil darin ein unabhängiges Gericht der USA, der größten Nuklearmacht des Globus, am Ende eines kontradiktorischen Verfahrens, die strukturellen und zwar unbehebbar Schwächen der Nuklearindustrie wegen der unlösbaren Problematik der Endlagerung der hochstrahlenden Nuklearabfälle offenlegt.

Bedenkt man, dass der von der geschriebenen Geschichte der Menschheit erfasste Zeitraum etwa 5.000 Jahre umfasst, wird deutlich, dass die hier angesprochenen Lagerungsbedürfnisse von mehreren Millionen Jahren allen erdenklichen Interpretationen des Begriffes der Nachhaltigkeit spotten. Dieses Missverhältnis wird durch die geplanten legislativen Maßnahmen zur Rettung des Yucca Mountain Endlagers geradezu zur Groteske gesteigert. Die vom Endlager ausgehende höchstzulässige Strahlenbelastung für Menschen in einer Entfernung von 11 Meilen soll nämlich zeitlich gestaffelt werden. Für die ersten 10.000 Jahre soll diese 15 millirem jährlich und die nächsten 990.000 Jahre 350 millirem betragen⁷⁰. Sicherheitsgesetzgebung mit einem zeitlichen Geltungsbereich von 1 Million Jahre! Der ganz normale Wahnsinn.

12.7 Deutschlands Ausstieg aus der Kernenergie

Aus all diesen Gründen haben die seinerzeitige Rot-Grüne Koalitionsregierung und das Parlament der Bundesrepublik Deutschland die Konsequenz gezogen, aus der „Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität“⁷¹ auszusteigen. Das erspart ihr freilich nicht den Zwang, für die einstweilen immer noch anfallenden und schon angefallenen abgebrannten Brennelemente und radioaktiven Abfälle letztlich durch Endlager vorzusorgen. Ab etwa 2005 sollen die Auswahlkriterien festgelegt und ab dann mit der Wahl eines Standortes begonnen werden. Unter einem wurde für jedes KKW die Rücklage für allfällige Schadensfälle um das 10fache auf je 2,5 Mrd. Euro erhöht⁷².

Solcherart ist die Bundesrepublik Deutschland, soweit ersichtlich, der erste⁷³ Staat, welcher kompromisslose Konsequenzen aus der mangelnden Nachhaltigkeit der Kernenergie gezogen hat.

⁶⁸ Yucca Mountain-Urteil, S. 31.

⁶⁹ Weitere Informationen unter ><http://www.reviewjournal.com>< vom 16. September 2004 („Yucca Mountain Project: U.S. Supreme Court intervention sought“) und ><http://www.yuccamountain.org/court/lawsuits.htm><.

⁷⁰ Las Vegas Review-Journal Oct. 12, 2005, <http://reviewjournal.printthis.clickability.com>;

⁷¹ Dt. BGBl. I 26/2002.

⁷² Kurzinformation des dt. Bundesumweltministeriums, ><http://www.bmu.de/de/1024/js/sachthemen/atomkraft/kurzinfo/>< (eingesehen: 28.10.2004).

⁷³ Schweden (1980) und Italien (1990) haben zwar schon vor der Bundesrepublik Deutschland (am 27. April 2002 ist das Gesetz zum Ausstieg aus der Atomenergienutzung in Kraft getreten) Ausstiegsbeschlüsse gefasst, jedoch nicht unter ausdrücklichem Hinweis auf die mangelnde Nachhaltigkeit dieser Form der Energiegewinnung.

Die Neuwahlen vom 18. September 2005 haben zu keiner Änderung dieser energiepolitischen Position geführt, weil sich die Koalitionspartner auf keine gemeinsame KKW Politik einigen konnten⁷⁴.

12.8 Schlussfolgerungen

Die hiermit vorgelegte Analyse belegt anhand der ausgewählten Dokumente mit größter Deutlichkeit, dass die Gewinnung von Elektrizität aus Kernenergie die Prinzipien der Nachhaltigkeit über jeden Zweifel erhaben verletzt. Die mit der wirtschaftlichen Nutzung der Kernenergie verbundenen Risiken erzeugen einen rechtlichen Regelungsbedarf, der die nationalen Rechtserzeugungsinstanzen jede für sich überfordert, was der Nuklearindustrie jeweils eine bequeme Autonomie beschert. Gerade deswegen, wie es scheint, verhindern die Regierungen der KKW-Staaten alle Versuche, auf der völkerrechtlichen, aber auch auf der Ebene der EAG, konkrete Rechtsnormen jenseits der nationalen Rechtsordnungen zu deren Ergänzung und auch Kontrolle zu erlassen. Die dargestellten völkerrechtlichen Verträge und Entwürfe von Richtlinien auf der Ebene der EAG gehen über das Allgemeine, über das Prinzipielle nicht hinaus. Das ist klares politisches Kalkül. Oberstes Prinzip der Regierungen der KKW-Staaten ist die Wahrung der exklusiven Regelungskompetenz für die Nuklearwirtschaft unter möglichst dichtem Ausschluss jeglicher Einsichtnahme. Das zeigt sich nicht zuletzt auch in den restriktiven Formulierungen der bilateralen Staatsverträge über die Benachrichtigung von Störfällen in Kernkraftwerken [Manfred Rotter]⁷⁵, oder auch in den Versuchen, auf völkerrechtlicher Ebene Begrenzungen der Haftung für Schäden aus KKW-Störfällen zu vereinbaren [Karl Arlamovsky]⁷⁶.

Die Ausweglosigkeit des Regelungsbedarfes der Kernwirtschaft gipfelt rund 60 Jahre nach der Inbetriebnahme der ersten kommerziellen Kernkraftwerke mit erschreckender Deutlichkeit immer noch in der ungelösten Endlagerproblematik. Die dabei zu bewältigenden Zeitdimensionen belegen vollends die geradezu strukturelle Unvereinbarkeit der kommerziellen Nutzung der Kernenergie mit den Prinzipien der Nachhaltigkeit.

12.9 Zusammenfassung

- Der Begriff „Nachhaltigkeit“ nach der Brundtland-Formel bedarf auch als Bestandteil außerrechtlicher Normensysteme der Konkretisierung, um auf spezifische Problemstellungen angewandt werden zu können. Das heißt, er muss in der konkreten Situation um zusätzliche Wert- und Zielentscheidungen angereichert werden.
- Der Kern der Anwendbarkeit des Nachhaltigkeitsprinzips liegt in einer erweiterten Verteilungsproblematik in der Projektion auf die Generationsfolge. In diesem Sinne ist es auf die Erzeugung von elektrischer Energie aus Kernenergie sehr gut anwendbar. Dabei geht es um die

⁷⁴ Gemeinsam für Deutschland. Mit Mut und Menschlichkeit. Koalitionsvertrag von CDU/CSU/SPD (http://www.spd.de/servlet/PB/show/1589444/1105_Koalitionsvertrag; www.cdcsu.de/upload/Koalitionsvertrag).

⁷⁵ Hier nicht weiter behandelt, dazu z.B. Manfred Rotter, Rechtsfragen eines künftigen Tschechisch-Österreichischen Abkommens betreffend gemeinsame Interessen im Bereich der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes (Endbericht in 2 Bänden); unveröffentlicht (2002).

⁷⁶ Hier nicht weiter behandelt. Siehe dazu zusammenfassend Karl Arlamovsky, Sind Kernkraftwerke aus rechtswissenschaftlicher Sicht ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung gemäß Art. 12 Kyoto-Protokoll?, in Kernenergie, Klimaschutz und Nachhaltigkeit, Ein Argumentarium zur Vorbereitung der COP6 (Manuskript).

Verteilung der Ressource Umwelt und die Verteilung der dabei entstehenden Lasten zwischen den gegenwärtigen und künftigen Generationen.

- In Projektion auf die Energieversorgung könnte das Nachhaltigkeitsgebot wie folgt formuliert werden: Der so gering wie möglich zu haltende Energiebedarf der jetzigen Generation ist mit dem geringst möglichen Aufwand an Ressourcen und den geringst möglichen Eingriffen in die Umwelt zu gewährleisten. Nach den Grundsätzen der Kostenwahrheit und des Verursacherprinzips sind die Lasten der Energiegewinnung ausschließlich von jenen Generationen zu tragen, die sich ihrer bedienen.
- Für die rechtliche Operationalisierung des Nachhaltigkeitsprinzips gibt es im besonderen Völkerrecht (spezifische von völkerrechtlichen Verträgen getragene Rechtsbereiche) und auch im Gemeinschaftsrecht viel versprechende Ansätze mit durchaus plausiblen Verfahrensstrukturen. Allerdings bedarf es auch hier der entsprechenden Konkretisierung im Einzelfall, um entsprechende Rechtsfolgen zu erzielen. Vor übereilten und übertriebenen Hoffnungen muss daher gewarnt werden.
- Das (IAEO-)Übereinkommen über die Nukleare Sicherheit ist zehn Jahre nach Tschernobyl und rund 40 Jahre nach der Inbetriebnahme der ersten KKW in Kraft getreten. Sein Inhalt erweckt den Eindruck, dass ausschließlich jene Verpflichtungen und zwar in jenen Formulierungen festgeschrieben wurden, welche die Vertragsstaaten ohnehin schon erfüllt hatten.
- Konkrete Sicherheitskriterien werden geflissentlich vermieden. Das Übereinkommen begnügt sich mit Sicherheitsgrundsätzen. Es verweist vage auf nicht näher beschriebene Sicherheitsrichtlinien, die dem jeweiligen technischen Standard angepasst werden.
- Die Rechtssetzungsautonomie der KKW-Staaten bleibt unangetastet. Eine Kontrolle der Einhaltung auch nur dieser Sicherheitsgrundsätze beschränkt sich auf ein System der Berichterstattung an die alle drei Jahre stattfindende Tagung der Vertragsparteien, die im Konsens zu entscheiden hat.
- Durchaus respektable Versuche der EU-Kommission, im Bereich der EAG die Sicherheitserfordernisse gemeinschaftsweit zu standardisieren, sind gescheitert, obgleich im materiellen Teil der erarbeiteten Vorschläge für entsprechende Richtlinien wie im (IAEO-)Übereinkommen nur Grundsätze und keinerlei Eckdaten enthalten waren. Allerdings gab es ein im Ansatz erfolversprechendes Kontrollsystem und Vorkehrungen für die gemeinschaftsweite geordnete Entsorgung still zu legenden Kernkraftwerke. Der eigentliche Fortschritt dieses Entwurfes wäre endlich die Etablierung der Gemeinschaftszuständigkeit für KKW-Sicherheit gewesen.
- Der mittlerweile erfolgte noch mildere zweite Anlauf der EU-Kommission geht wie der erste inhaltlich nicht über das (IAEO-)Übereinkommen hinaus, verzichtet aber auf ein auch nur ansatzweise effizientes Kontrollsystem und lässt die Problematik der Entsorgung stillgelegter KKW unberücksichtigt. Die grundsätzliche Möglichkeit, den EuGH mit Verletzungen der enthaltenen Sicherheitsgrundsätze zu befassen, bliebe im Kern bestehen.
- Für die Entsorgung still gelegter Kernkraftwerke muss Schätzungen der EU-Kommission zufolge mit einem finanziellen Aufwand von etwa 15 % der Gesamtinvestitionskosten oder in absoluten Zahlen zwischen 200 Millionen und 1 Mrd. Euro gerechnet werden. Dabei ist zu

berücksichtigen, dass diese Kosten eben erst nach Stilllegung, das heißt nach Wegfall der Einnahmen entstehen. Geht man von einer Funktionsdauer eines KKW von 40 Jahren aus, so stellt sich bereits in diesem Fall das Problem der möglichen Kostenverlagerung auf jene Generation, die das stillgelegte KKW selber gar nicht mehr nutzen kann.

- Die Sicherung von Endlagerstätten auf die nächsten 10.000 Jahre ist eine Überforderung aller erdenklichen gesellschaftlichen Regelungsstrukturen. Zum Vergleich: Die bisher erfasste Geschichte der Menschheit reicht etwa 5000 Jahre zurück. Die politische Führung der KKW-Staaten ist gefordert, hoch komplexe, kollektive Willensbildungs- und Entscheidungsstrukturen heute über zwei Mal den Bogen der bisherigen Menschheitsgeschichte zu projizieren.
- Bei näherem Hinsehen erweist sich aber das 10.000 Jahr-Limit als willkürliche Annahme. Allein die Halbwertszeit von zwei unter anderem ebenfalls zu deponierenden Elementen liegt weit darüber. Neptunium-237 hat eine solche von mehr als 2 Millionen und Jod-129 gar von 16 Millionen Jahren.
- So hat der United States Court of Appeals für den District of Columbia Circuit mit Urteil vom 9. Juli 2004 die Entscheidung der zuständigen US-Bundesbehörden für das Yucca Mountain-Massiv als bundesweites Endlager für Nuklearabfälle aufgehoben (mittlerweile rechtskräftig), weil das 10.000-Jahr-Limit zu kurz greift. Die Konsequenz ist eine auf 1 Million Jahre bezogene gesetzliche Festlegung von Emissionsgrenzen. Der ganz normale Wahnsinn!

Einfach gesagt: Häufig gestellte Fragen (FAQ)

Januar 2007

Einfach gesagt: Häufig gestellte Fragen (FAQ)

Januar 2007

Übergreifendes

1. Kann man angesichts des Klimawandels noch ohne Kernenergie auskommen?

Ja. Effizientere Nutzung von Energie hat mehr zur Deckung des erhöhten Energiebedarfes der letzten Jahrzehnte beigetragen als Kernenergie, und die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung sind noch bei weitem nicht ausgeschöpft. Kernenergie wird auch in absehbarer Zukunft wegen der langen Vorlaufzeiten nicht in der Lage sein, einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

2. Kann auch nach Auftreten von „Peak Oil“¹ auf Kernenergie verzichtet werden?

Ja. Kernenergie kann das Öl nicht ersetzen: bei der Anzahl der erforderlichen Anlagen müsste eine weniger risikoreiche Nukleartechnologie eingesetzt werden, die es aber derzeit noch nicht gibt. Auch ist spaltbares Uran nicht in ausreichendem Ausmaß verfügbar um diese große Zahl von Kernkraftwerken zu betreiben. Energie für den Mobilitätsbereich könnte Kernenergie nur über die sehr ineffiziente Wasserstoffproduktion bereitstellen. Effizienzmaßnahmen und strukturelle Änderungen werden daher auch bei „Peak Oil“ die Hauptrolle spielen müssen.

3. Ist Kernenergie als saubere, CO₂-freie Energieform nicht der einzige nachhaltige Ausweg aus dem Energie-Dilemma?

Nein. Kernenergie ist weder nachhaltig noch CO₂-frei: Eine Technologie ist nur dann nachhaltig, wenn sie umwelt- und sozialverträglich, überschaubar, flexibel und fehlertolerant ist, und darüber hinaus die Entwicklung der Nachhaltigkeit fördert. Kernenergie erfüllt keines dieser Kriterien. Betrachtet man den gesamten Zyklus, von der Urangewinnung bis zur Endlagerung, ist Kernenergie auch keineswegs CO₂-frei.

Normalbetrieb

4. Sind geringe Strahlendosen, wie sie Kernkraftwerke im Normalbetrieb abgeben, überhaupt schädlich?

Ja. Experimente und die Auswertung medizinischer Statistiken zeigen, dass es keine unschädliche Dosis gibt. Bei niedriger Dosis wird lediglich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden ein-

¹ Mit „Peak Oil“ wird der Zeitpunkt bezeichnet, ab dem die weltweite Ölproduktionsrate zurückgeht, und daher mit Verknappung und signifikanter Verteuerung des Öls zu rechnen ist. Man geht davon aus, dass „Peak Oil“ innerhalb dieses oder einem der nächsten Jahrzehnte eintritt.

tritt, geringer. Erhöhte Krebshäufigkeiten wurden aus der Umgebung von Kernkraftwerken in Deutschland, USA, Japan und Kanada berichtet, ebenso aus der Nachbarschaft der Wiederaufarbeitungsanlagen La Hague (Frankreich) und Sellafield (Großbritannien). Manche Schäden treten erst nach Generationen in größerem Ausmaße zutage.

Sicherheit

5. Die Sicherheit der Kernkraftwerke wird ständig verbessert. Ist das Sicherheitsproblem nicht schon gelöst ?

Nein. Die Katastrophe von Tschernobyl hat deutlich gezeigt, dass auch in als sicher bezeichneten Kernkraftwerken schwere Unfälle auftreten können. Trotz einer Phase der Verschärfung der Sicherheitsbestimmungen zeigen zahlreiche Ereignisse der letzten Jahre auf, dass Unfälle nach wie vor nicht auszuschließen sind. Auch halten viele Kernkraftwerke nicht alle Sicherheitsempfehlungen der IAEO ein.

6. Lösen die zukünftigen, sogenannten „inhärent sicheren“ Reaktoren das Sicherheitsproblem?

Nein. Die „inhärente Sicherheit“ ist noch für keinen Reaktor nachgewiesen. Sie gilt a priori auch nur für Auslegungsstörfälle, nicht für externe Bedrohungen und keinesfalls gegenüber Terror- oder Kriegsakten. Die Reaktoren der übernächsten Generation IV beruhen auf ganz anderen Konzepten, die neue Sicherheitsprobleme aufwerfen und zusätzlich in die Plutoniumwirtschaft führen. Plutonium ist nicht nur radioaktiv sondern auch sehr toxisch, und erleichtert die Weiterverbreitung von Atomwaffen. Es ist unrealistisch zu erwarten, dass neue Reaktor- und Brennstoffzyklustechnologien gleichzeitig die Probleme der Kosten, der Sicherheit, des nuklearen Abfalls und der Weiterverbreitung von Atomwaffen lösen.

7. Warum wird gerade bei der Kernenergie der Sicherheitsaspekt in den Vordergrund gerückt? Sind nicht etwa chemische Anlagen mit einem ebensolchen Risiko behaftet?

Das Besondere am Risiko der Kernenergie ist, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen schweren Unfall zwar klein ist, die Folgen im Fall des Falles aber katastrophal sind. Betroffen sind dann auch Menschen und Staaten, die vom Betrieb des Kernkraftwerkes nie einen Nutzen hatten, und die betroffenen Landstriche können auf Jahrhunderte hinaus unbewohnbar sein. Aber selbstverständlich gilt die Forderung nach Abbau von Katastrophenpotentialen auch für andere Bereiche, z.B. die chemische Industrie.

8. Hat die Liberalisierung des Strommarktes Auswirkungen auf das Unfallrisiko von Kernkraftwerken?

Ja. Der gestiegene Druck auf die Kosten führt z.B. zu Personalabbau und Einsparungen im Sicherheitsbereich. Insbesondere hat er in den letzten Jahren auch in manchen Fällen zu einer Abschwächung von Sicherheitsnormen und zu einer Verschlechterung der Sicherheitskultur geführt.

9. Werden nicht ohnehin viele Kernkraftwerke in Kürze aus Altersgründen abgeschaltet?

Wegen des steigenden Energiebedarfes und der Schwierigkeiten, Akzeptanz für Neuanlagen zu finden, wird versucht, die Betriebsdauer von Kernkraftwerken zu verlängern. Bedauerlicherweise steigt aber das Risiko ab einem gewissen Alter², vor allem weil verschiedene Komponenten aufgrund der intensiven Beanspruchung Materialermüdungserscheinungen aufweisen. Dass dies in eine Zeit fällt, in der die Liberalisierung des Strommarktes extreme Sparprogramme auslöst und in der es wegen der jahrelangen Stagnation der Kernenergie nicht genug qualifizierten Nachwuchs, und in vielen Fällen keine geeigneten Ersatzteillager gibt, verursacht auch Kernenergiebefürwortern ernste Sorgen.

Radioaktive Abfälle

10. Sind Transporte und Lager mit radioaktiven Abfällen nicht praktisch katastrophensicher?

Nein. Sowohl bei Transport als auch bei Zwischenlagerung sind bei Unfällen oder Terrorangriffen schwere radioaktive Freisetzungen möglich. Bei der Endlagerung in geologischen Tiefenlagern gibt es noch viele Wissenslücken und unzählige noch offene Detailprobleme. Es ist auch nicht möglich über den geforderten Zeitraum von 1 Million Jahren Garantien für die sichere Lagerung abzugeben.

11. Die kontrollierte Lagerung an der Oberfläche wird von manchen Gruppen als einzig verantwortbares Vorgehen propagiert. Was ist davon zu halten?

Es ist nicht vorherzusehen, ob künftige Gesellschaften in Jahrhunderten oder gar Jahrtausenden in der Lage sein werden, die Kontrolle über die Lager aufrecht zu erhalten. Wie alle anderen Lagerungsoptionen bürdet sie den künftigen Generationen die Sorge um den radioaktiven Müll auf. Sie schafft im Vergleich zur geologischen Tiefenlagerung bessere Voraussetzungen für den Erhalt des Wissens um die Lager und hält die Möglichkeit einer Behandlung bei Fortschritt des Wissens offen, bietet aber kurzfristig weniger Schutz vor Freisetzungen als ein Tiefenlager.

12. Können radioaktive Abfälle durch Transmutation unschädlich gemacht werden?

Transmutation setzt eine sehr aufwendige Abtrennung durch Wiederaufarbeitung voraus, also durch ein Verfahren, das mit hohen Umweltbelastungen und Unfallrisiken verbunden ist. Außerdem werden auch nach Transmutation noch langfristige Endlager benötigt. Und schließlich ist diese Technik nach wie vor weit von einer Anwendung im größeren Maßstab entfernt. Vor allem ist aber zu bedenken, dass die voluminösen schwach- und mittelradioaktiven Abfallfraktionen für solche Verfahren nicht in Frage kommen. Trotz hoher Kosten könnte man über Transmutation das Radioaktivitätsproblem daher nicht lösen.

² Wie bei einem PKW treten auch bei Kernkraftwerken Fehler besonders häufig in der Anfangsphase („Kinderkrankheiten“) und dann wieder gegen Ende der Lebenszeit auf („Badewannenkurve“).

13. Wie kann dann das Problem der radioaktiven Abfälle gelöst werden?

Eine befriedigende Lösung gibt es nicht. Es muss daher der Neuanfall von radioaktivem Abfall minimiert werden. Für den bereits vorhandenen muss in einem breit angelegten öffentlichen Diskurs eine Konsenslösung angestrebt werden.

Terror und Krieg

14. Sind Kernkraftwerke „attraktive“ Ziele für Terrorangriffe?

Ja. Aufgrund der möglichen langfristigen Wirkungen eines Anschlags, der Auswirkungen auf die Elektrizitätsversorgung sowie des Symbolcharakters der Kerntechnologie können Kernkraftwerke aus der Sicht von Terroristen als „interessante“ Ziele erscheinen. Es ist möglich, dass das am 11.9.2001 in Pennsylvania entführte, aber abgestürzte Flugzeug ein Kernkraftwerk zum Ziel hatte.

15. Welche Folgen können Terrorangriffe oder militärische Aktionen auf kerntechnische Anlagen haben?

Bei Angriffen auf ein Kernkraftwerk (z.B. durch Flugzeugabsturz oder Beschuss) kann es zu ähnlichen radioaktiven Freisetzungen kommen wie bei der schlimmsten Kategorie von Reaktorunfällen. Unzählige Tote und großräumig verstrahlte Flächen können die Folge sein.

16. Sind überhaupt wirksame Gegenmaßnahmen gegen Terrorangriffe oder militärische Aktionen möglich?

Technische Schutzmaßnahmen und erhöhte Kontrollen an den Standorten kerntechnischer Anlagen, ebenso wie polizeiliche, geheimdienstliche und militärische Vorkehrungen können Gefahren reduzieren, sie aber nicht ausschalten. Auch hier zeigen sich klare Nachteile einer zentralisierten, nicht nachhaltigen Technologie, wie der Kernenergie, die ein großes Katastrophenpotenzial in sich birgt.

Katastrophenschutz

17. Kann ein effektiver Katastrophenschutz die Folgen eines nuklearen Unfalles wesentlich abmildern?

Unter günstigen Umständen können die Auswirkungen eines schweren Unfalles gemildert, aber nicht verhindert werden. Kaliumjodidtabletten, rechtzeitig eingenommen, verhindern z.B. lediglich die Einlagerung von radioaktivem Jod in der Schilddrüse – sie schützen nicht vor den anderen Folgen der Bestrahlung. Bei schweren Unfällen kann die radioaktive „Wolke“ schon innerhalb weniger Stunden in die Atmosphäre gelangen und Maßnahmen wie Einnahme von Jodtabletten oder Evakuierung können in solchen Fällen kaum rechtzeitig durchgeführt werden.

18. Was zeigen die bisherigen Erfahrungen bei nuklearen Unfällen?

Die Unfälle von Three Mile Island (USA) und Tschernobyl zeigten, dass welche Katastrophenpläne auch immer vorhanden waren, diese jedenfalls nicht ausreichend waren. Noch in jüngster Vergangenheit – 1999 – erfolgte beim Unfall in Tokai Mura, Japan, die Information der Behörden zu spät und die Einleitung von Gegenmaßnahmen zu langsam. Trotzdem oder gerade deshalb besteht vielschichtiger und aufwendiger Handlungsbedarf, um für künftige Nuklearunfälle weniger schlecht vorbereitet zu sein.

19. Ist die Notwendigkeit zum Katastrophenschutz auf Staaten beschränkt, in denen Kernkraftwerke betrieben werden?

Nein. Radioaktive Wolken machen vor Staatsgrenzen nicht halt; sie können innerhalb eines Tages hunderte Kilometer zurücklegen. Der Unfall von Tschernobyl hat dies eindringlich illustriert. Auch Länder ohne Kernkraftwerke können daher von Katastrophen betroffen werden; auch sie müssen aufwendige Planungen und Vorbereitungen für den Ernstfall betreiben.

Proliferation

20. Wurden jemals Nuklearwaffen mit illegal vom kommerziellen Brennstoffzyklus abgezweigtem Plutonium hergestellt?

Nein. Obwohl es grundsätzlich möglich ist, hat Proliferation vom kommerziellen Brennstoffkreislauf noch nicht stattgefunden. Von zehn Staaten ist bekannt oder besteht der Verdacht, Kernwaffen entwickelt zu haben, aber nicht alle haben Einrichtungen benutzt, die erklärtermaßen einem Waffenprogramm dienen.

21. Kann man aus abgebrannten Brennstäben kommerzieller Kernkraftwerke Nuklearwaffen bauen?

Ja. Es ist allgemein anerkannt, dass fast jedes Plutonium zur Herstellung von Waffen verwendet werden kann. Das sogenannte „waffenfähige“ Plutonium kommt von Reaktoren bei denen die Brennstäbe nach relativ kurzer Zeit entfernt werden. Das maximiert den relativen Anteil von Plutonium-239 (> 90 %), was für Nuklearwaffen erwünscht ist.

22. Können Nuklearwaffen von „Neulingen“ entworfen und gebaut werden?

Ja. Die Konzepte der ersten Generation von Kernwaffen sind allgemein bekannt. Schwierig ist es, verfeinerte Waffen von geringer Größe und Gewicht zu entwerfen. Waffenfähiges Material ist heute leichter verfügbar und billiger herzustellen als vor einigen Jahrzehnten, und nicht-nukleare Tests sind ausreichend, um Vertrauen in die Funktionsfähigkeit von Implosionswaffen herzustellen.

Zeitperspektive

23. Kann der Ausbau der Kernenergie rasch genug erfolgen, um den Erfordernissen des Klimaschutzes und des knapper werdenden billigen Öls zeitgerecht zu begegnen?

Nein. Die neue Generation von sogenannten „inhärent sicheren“ Kernkraftwerken – eine Voraussetzung für einen großzügigen Ausbau der Kernenergie – soll erst in etwa 10 Jahren verfügbar sein. Es gibt immer noch keine akzeptable Lagerung des vermehrt anfallenden radioaktiven Abfalls. Die für den Ausbau der Kernenergie erforderliche Expertise und Arbeitskraft kann praktisch nicht rechtzeitig und in ausreichendem Umfang bereitgestellt werden. Schon jetzt ist in mehreren Betreiberstaaten ein Engpass bei geschultem Personal festzustellen. Außerdem müssen viele Kernkraftwerke innerhalb des nächsten Jahrzehnts vom Netz genommen werden, weil sie das Ende ihrer Lebenszeit erreicht haben. Die in Bau befindlichen Kernkraftwerke werden diese Verluste nicht kompensieren können, und neue Kernkraftwerke kommen zu spät.

Beitrag zum Klimaschutz

24. Ist Kernenergie nicht die billigste Art die Freisetzung von Treibhausgasen zu reduzieren?

Nein. Als Methode zur CO₂ Reduktion kann die Kernenergie mit einer großen Bandbreite an schon verfügbaren Alternativen nicht mithalten. Besonders die Energieeffizienz hat zusätzlich zu den allgemeinen umweltbezogenen Vorteilen einen klaren wirtschaftlichen Vorteil, und bringt zusätzlich eine Verbesserung der Versorgungssicherheit. Darüber hinaus zeigen Analysen der Projektkosten anderer CO₂-freier oder CO₂-armer Technologien, dass erneuerbare Energie aufgrund der mit wachsender Produktion sinkenden Preise zunehmend günstiger wird.

25. Kann Kernenergie als langfristige Überbrückungstechnologie gesehen werden?

Nein. Auch die Vorkommen spaltbaren Urans 235 sind begrenzt. Ohne zusätzlichen Ausbau der Kernenergieproduktion reichen die derzeit bekannten Uranvorräte, die zu Kosten bis zu etwa 100 € pro Tonne gewonnen werden können, weniger als ein Jahrhundert. Bei Verdopplung des Beitrages der Kernenergie bis 2030 sind die Vorräte innerhalb der nächsten 4 bis 5 Jahrzehnte erschöpft. Danach würde man nach derzeitigen Konzepten großteils auf Kraftwerkstypen umsteigen, die das reichlich vorhandene Uran 238 nutzen. Dies würde jedoch den Einstieg in eine Plutoniumwirtschaft mit all ihren Schwierigkeiten und Risiken bedeuten.

26. Können die Kyoto-Ziele auch ohne Ausbau der Kernenergie erreicht werden?

Ja. Es gibt Studien, die zeigen, dass selbst die langfristig von der EU angestrebte Stabilisierung der Temperatur auf global +2 °C ohne Kernenergie erreichbar ist. Dabei wird allerdings entweder von Sequestrierung (Bindung oder Lagerung z.B. in entleerten Erdgaslagerstätten) nennenswerter Mengen von CO₂ oder von einer Senkung des Bedarfszuwachses für Energie ausgegangen.

Wirtschaftliche Aspekte

27. Bietet Kernenergie wirtschaftlich gesehen Vorteile?

Nein. Die OECD Länder, die ein Ausbauprogramm von Kernkraftwerken in Erwägung ziehen, Finnland und die USA, haben direkte oder indirekte finanzielle Unterstützungsprojekte für den Nuklearsektor veranlasst, um Investoren anzulocken. Im Falle der USA, beinhaltet dies ein komplexes Paket an Maßnahmen, das den Steuerzahler für ein Programm, das sechs bis acht Reaktoren umfasst, wahrscheinlich etwa 13 Milliarden US \$ kosten wird. Obwohl bei der Kostenberechnung für Kernenergie viele externe Kosten nicht berücksichtigt werden, schneidet sie wirtschaftlich nicht besser ab als die meisten alternativen Energien. Energieeffizienzsteigerungen (Senkung der Energieintensität der Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen sowie des privaten Endverbrauches) sind sowohl kostenmäßig als auch bezüglich ihres CO₂-Einsparungspotentials günstiger als jede Art der zusätzlichen Bereitstellung von Energie.

28. Werden die Kosten für Kernenergie sinken?

Nicht wesentlich. Ein Vergleich der Kostenentwicklung zeigt, dass die Kosten der Kernenergie im Vergleich zu den meisten alternativen Energien wenig gefallen sind. Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass sich dies in nächster Zeit ändern wird.

29. Wird Kernenergie von der öffentlichen Hand subventioniert?

Ja. Die Kosten für spezielle Genehmigungs- und Überwachungsbehörden, kontinuierliches Radioaktivitätsmonitoring und aufwendige Katastrophenvorsorge auf nationaler Ebene und für Sicherheitsvereinbarungen etwa gegen Missbrauch spaltbaren Materials (z.B. Safeguards, CTBTO) auf internationaler Ebene trägt die öffentliche Hand. Auch die Forschungs- und Entwicklungskosten der Kernenergie werden in wesentlich größerem Maße als bei anderen Technologien von der öffentlichen Hand getragen. Darüber hinaus trägt die Kernenergie nicht die Last der Versicherung, die anderen Industrien zwingend aufgelastet wird.

30. Sind die nuklearen Risiken durch Versicherungen abgedeckt?

Nein. Das internationale Haftungsregime für Schäden durch Nuklearanlagen teilt die Haftung zwischen dem Betreiber, dem Staat, in dem die Anlage sich befindet, und den Vertragsstaaten. Darüber hinaus wird die Haftungssumme insgesamt für Schäden aus Nuklearanlagen begrenzt. Wäre Europas größter Kernkraftwerksbetreiber, Electricité de France, verpflichtet, Schäden bei einem schweren Nuklearunfall in vollem Ausmaß zu versichern, würde dies die Stromerzeugungskosten um ca. 200 % anheben.

Nuklear erzeugter Wasserstoff

31. Kann nuklear erzeugter Wasserstoff den Treibstoff im Verkehrssektor sowohl hinsichtlich Klimaschutz als auch „Peak-Oil“ ersetzen?

Nein. Ohne Lösung der bekannten Probleme der Kernenergie ist die nukleare Erzeugung von Wasserstoff schon allein aufgrund der großen Zahl der erforderlichen Kernkraftwerke zur Erzeugung einer relevanten Menge an Wasserstoff nicht gangbar. Dies wird noch durch die niedrige Gesamteffizienz des Prozesses unterstrichen, die sich auch bei neuen Kernkraftwerkstypen nur wenig verbessern wird. Die grundsätzlichen, mit der Wasserstoffwirtschaft in Zusammenhang stehenden Probleme sind - unabhängig von der Art der Erzeugung - ebenfalls beträchtlich. Ernsthaftige Untersuchungen der Auswirkungen auf die Umwelt stehen überhaupt noch aus.

Rechtliche Dimension

32. Könnte man nicht die Probleme und Gefahren der Nuklearindustrie auf internationaler Ebene lösen?

Die Gefahren der Nuklearindustrie sind strukturell inhärent. Auf internationaler bzw. europäischer Ebene könnte man das Gefahrenpotential durch grenzüberschreitende Kooperation reduzieren, aber nicht völlig beseitigen. Alle Versuche in diese Richtung werden durch die Nuklearindustrie behindert, die sich gegen strenge völkerrechtliche oder gemeinschaftsrechtliche Regelungen oder gar Kontrollen wehrt.

Abkürzungen

Abkürzungen

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor (General Electric, GE) / Fortgeschrittener Siedewasserreaktor, leichwassergekühlt und -moderiert
ACR-700	Advanced CANDU Reactor, 700 MWe Klasse (Atomic Energy of Canada, Limited) / Fortgeschrittener schwerwassermoderierter Reaktor, leichwassergekühlt, niedrig angereicherter Uranbrennstoff
AECL	Atomic Energy of Canada, Limited
AGR	Advanced Gas-Cooled Reactor / Fortgeschrittener CO ₂ -gekühlter Reaktor, Graphit moderiert
AHTR	Advanced High Temperature Reactor / Fortgeschrittener Hochtemperatur Reaktor
AP1000	Advanced Passive 1000 MWe / Fortgeschrittener passiver Druckwasserreaktor der 1000 MWe Klasse (Westinghouse)
AP600	Advanced Passive 600 MWe / Fortgeschrittener Druckwasserreaktor der 600 MWe Klasse (Westinghouse)
B	Barrel; 1 B rund 159 l Öl (s. Glossar)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
BWR	Boiling Water Reactor / Siedewasserreaktor
CANDU	Canadian Deuterium-Uranium Reactor / Kanadischer Deuterium-Uran Reaktor, schwerwassergekühlt und -moderiert, Natururan-Brennstoff (Atomic Energy of Canada, Limited, AECL)
CDF	Core Damage Frequency / Eintrittswahrscheinlichkeit von Kernschmelze
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Conference of the Parties im Rahmen der UNFCCC
EOP	Emergency Operating Procedures / Störfallverordnungen
EPR	European Pressurized Reactor (Areva NP) / Europäischer Druckwasserreaktor, leichwassergekühlt und -moderiert
ESBWR	Kein Acronym; Bezeichnung von General Electric für einen Fortgeschrittenen Siedewasserreaktor, leichwassergekühlt und -moderiert

ETA	Baskische Separatisten Organisation
EAG	Europäische Atomgemeinschaft = EURATOM
FBR	Fast Breeder Reactor / Schneller Reaktor
FCKW	Fluorierte Chlorkohlenwasserstoffe (=Treibgase und Kältegase)
Gb	Gigabarrel; 1 Gb = 1.000.000 Barrel
GCM	Global Climate Model oder Global Circulation Model
GFR	Gas-cooled Fast Reactor / Gasgekühlter, schneller Reaktor
GT-MHR	Gas Turbine Modular Helium Reactor / Modularer Gasturbinen-Heliumreaktor, gasgekühlt, graphitmoderiert (General Atomics)
Gtoe	Gigatonnen Öläquivalent (s. Glossar)
GW	Gigawatt: 1 GW = 1000 Megawatt
GWe	Gigawatt elektrische Leistung
H2-MHR	Modular High Temperature Gas Cooled Reactor – optimized for Hydrogen production / modularer Hochtemperaturreaktor – optimiert für Wasserstoffherzeugung
HLW	High Level Radioactive Waste / Hochradioaktiver Abfall
HTTR	Hochtemperaturtestreaktor
IAEO	Internationale Atomenergie Organisation
IEA	Internationale Energieagentur
INES	International Nuclear Event Scale / Skala zur Bewertung der Schwere nuklearer Ereignisse
INSAG	International Nuclear Safety Advisory Group of the IAEA
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISR	Inherently Safe Reactor Concept / Inhärent sicheres Reaktor Konzept
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute
LFR	Lead-cooled Fast Reactor / bleigekühlter schneller Reaktor

LNG	Liquefied Natural Gas / verflüssigtes Erdgas
LPG	Liquefied Propane Gas / verflüssigtes Propangas
LRF	Large Release Frequency / Eintrittswahrscheinlichkeit von großen Freisetzungen
LWGR	IAEA PRIS Abkürzung für den RBMK Reaktor
MAGNOX	Gas-cooled reactor / gasgekühlter Reaktor
MOX	Mixed Oxide; Kernbrennstoff nach Wiederaufarbeitung
MSR	Molten Salt-cooled Reactor / Salzschnmelzengekühlter Reaktor
MW	Megawatt: 1 MW = 1000 Watt
MWe	Megawatt elektrisch
MWt	Megawatt thermisch
NEA	Nuclear Energy Agency
NGL	Natural Gas Liquid
NPP	Nuclear Power Plant / Kernkraftwerk
OPB-88	Russische Sicherheitsvorschriften für Kernkraftwerke 1988 (ehemalige Sowjetunion)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development / Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OPEC	Organisation of the Petroleum Exporting Countries / Organisation Erdölexportierender Länder
OSPAR	Oslo/Paris Convention (for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic)
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor / Kugelhaufenreaktor gasgekühlt, graphitmoderiert, niedrig angereicherter Brennstoff (PBMR Pty., Ltd., South Africa)
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor / Druckwasserreaktor, schwerwassergekühlt, und -moderiert, horizontale Druckröhrenanordnung
PRIS	IAEA Power Reactor Information System / Kernkraftwerksinformationssystem
PSA	Probabilistic Safety Assessment / Probabilistische Sicherheitsanalyse

PUREX	Plutonium and Uranium Recovery by Extraction
PWR	Pressurized Water Reactor / Druckwasserreaktor
RBMK	Russisches Akronym; Siedewasserreaktor, leichtwassergekühlt, vertikale Druckröhrenanordnung (Sowjet. Anlage)
RODOS	Real-time On-line Decision Support System for Off-site Emergency Management in Europe; Echtzeit Online Entscheidungsunterstützungssystem für nukleares Krisenmanagement
ROI	Return of Investment
RPG	Rocket-propelled Grenades / raketenangetriebene Granaten (Panzerabwehrraketen)
RSK	Reaktor Sicherheits Kommission, Deutschland
SCWR	Super Critical Water-cooled Reactor / Überkritischer wassergekühlter Druckwasserreaktor
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor / Natriumgekühlter schneller Reaktor
STAR-H2	Secure Transportable Autonomous Reactor for Hydrogen Production
SWR-1000	Siedewasserreaktor, 1000 MWe Klasse (Areva NP)
TSO	Technical Support Organization / Technische Sachverständigenorganisation
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNGG	Natural Uranium fueled, Gas cooled, Graphite moderated reactor / gasgekühlter, graphitmoderierter Reaktor mit Natururan als Brennstoff
USD	US Dollar
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion
VHTR	Very High Temperature Reactor / Hochtemperaturreaktor, gasgekühlt, graphitmoderiert
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat für Globale Umweltfragen (Beratungsgremium des Deutschen Bundestages)
WEC	World Energy Council / Weltenergieerat
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association / Vereinigung der Europäischen Nuklearaufsichtsbehörden
WHO	World Health Organization / Weltgesundheitsorganisation

WNA World Nuclear Association

WWER Russisches Akronym / Druckwasserreaktor, leichtwassergekühlt und –moderiert
(Sowjet. Anlage)

Glossar

Glossar

Abbrand

Unter dem Begriff Abbrand versteht man in der Kerntechnik die Menge an Wärmeenergie, die pro Masseneinheit in einem Brennelement erzeugt wurde. Der Abbrand wird meist in Gigawatt-Tagen pro Tonne Schwermetall (GWd/t SM) ausgedrückt. Der Brennstoff von Kernreaktoren kann im Gegensatz zu fossilem Brennstoff nicht „in einem Zuge“ umgesetzt werden, das im Laufe des Einsatzes im Reaktor der Brennstoff Veränderungen erfährt, die ein Auswechseln der Brennelemente erfordern.

Anthropogen

Der Begriff anthropogen (vom griechischen anthropos = Mensch und von genese = Erzeugung/Er-schaffung) bezeichnet alles vom Menschen beeinflusste, verursachte oder hergestellte. So sind z. B. Kunststoffe anthropogen, weil sie nur vom Menschen und nicht in der Natur hergestellt werden.

Barrel

Das Barrel (abgekürzt bbl) ist die Bezeichnung für verschiedene Hohlmaße:
Im Erdölbereich entspricht ein oil barrel: 42 U.S. gallons (158,9873 Liter), oder circa 35 Imperial (UK) gallons (34,97231575 UK gallons genau). Diese Maß wird für Rohöl und Erdölprodukte verwendet und ist auf die frühen Ölfelder in Pennsylvania zurückzuführen. Sowohl 42-gallon Barrels (Fässer) (basierend auf altem englischen Weinmaß dem „tierce“) und 40-gallon (151,4 Liter) whiskey barrels standen in Verwendung. Aufgrund des Einflusses der Standard Oil Company erfolgte 1866 eine Standardisierung mit 42 Gallonen. Die Abkürzung „bbl“ für „blue barrel“ ergab sich daraus dass Standard Oil seine Fässer blau färbte.

Bentonit

Bentonit ist ein Tonmineral, das als wichtigsten Bestandteil Montmorillonit (60 - 80 %) enthält. Weitere Begleitminerale sind Quarz, Glimmer, Feldspat, Pyrit oder auch Kalk.

Becquerel

Becquerel ist die SI-Einheit der Radioaktivität (Formelzeichen A). Sie wird durch das Zeichen Bq abgekürzt. Benannt wurde sie nach dem französischen Physiker Antoine Henri Becquerel, der den Nobelpreis für die Entdeckung der Radioaktivität erhalten hat. 1 Bq = 1 s⁻¹. Mit anderen Worten hat also eine Substanz eine Radioaktivität von 1 Becquerel, wenn im Mittel pro Sekunde eines seiner instabilen Atome zerfällt.

Die Einheit Becquerel ersetzt im SI-System die alte Einheit für die Radioaktivität – das Curie. Zwischen diesen beiden Einheiten besteht folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie umwandelt. Im Sprachgebrauch steht Brennstoffzelle meist für die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle. Eine Brennstoffzelle hat als Energiespeicher, den Brennstoff eingerechnet, ein deutlich niedrigeres und somit günstigeres Leistungsgewicht als aktuelle Akkumulatoren.

business rates

Eine Abgabe, die im Vereinten Königreich von den lokalen Behörden eingehoben wird, um die Kosten lokaler Serviceleistungen abzudecken, vergleichbar mit einer Art Körperschafts- bzw. Gewerbesteuer.

BLEVE

Abkürzung für engl. „boiling liquid expanding vapour explosion“. Das ist ein Explosionstyp, der auftreten kann, wenn ein Gefäß, das eine unter Druck stehende Flüssigkeit enthält, platzt. Solche Explosionen können extrem gefährlich sein. Wenn es sich bei der Flüssigkeit um Wasser handelt, dann wird eine solche Explosion üblicherweise als „Dampfexplosion“ bezeichnet.

Bruttoinlandsprodukt

Das Bruttoinlandsprodukt (Abk.: BIP, englisch: gross domestic product, abbr.: GDP) ist ein Maß für die wirtschaftliche Leistung eines Landes. Das BIP gibt alle neu zur Verfügung stehenden Waren- und Dienstleistungen zu ihren aktuellen Marktpreisen an, die im Inland innerhalb einer definierten Periode von In- und Ausländern hergestellt wurden und dem Endverbrauch dienen. Werden Güter nicht direkt weiterverwendet, sondern auf Lager gestellt, gelten sie ebenfalls als Endprodukt (Vorratsveränderungen). Auf Grund der Betrachtung in Marktpreisen ist das (nominale) BIP nicht unabhängig von der Inflation der betrachteten Volkswirtschaft. Das nominale BIP steigt/sinkt bei Geldentwertung/Deflation und daraus folgenden steigenden/sinkenden Marktpreisen.

Cogeneration

Auch: Kraft-Wärme-Kopplung. Bei einer mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) betriebenen Energiewandlungsanlage wird sowohl die bei der chemischen oder physikalischen Umwandlung von Energieträgern entstehende Wärme als auch die durch die Energieumwandlung erzeugte elektrische Energie zu weiten Teilen genutzt.

Dampfreformierung

Die Dampfreformierung (englisch Steam Reforming) ist ein Verfahren zur Herstellung von Synthesegas, einer Mischung von Kohlenstoffmonooxid und Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern, wie Erdgas, Leichtbenzin, Methanol, Biogas oder Biomasse (vgl. Wasserstoffherstellung).

Darmepithel

Die Darmschleimhaut ist die innere Auskleidung des Darmes. Die Darmschleimhaut ist aus einer Epitheldecke mit einschichtigem Zylinderepithel, einer zarten Bindegewebsschicht und einer feinen Muskelschicht aufgebaut. Das Epithel ist eine biologisch - medizinische Sammelbezeichnung für Deckgewebe und Drüsengewebe. Das Epithel ist neben Muskel-, Nerven- und Bindegewebe eine der vier Grundgewebearten.

Desertifikation (Ausbreitung der Wüsten)

Desertifikation oder Verwüstung bezeichnet die Verschlechterung des Bodens in relativ trockenen (ariden, semiariden und trocken sub-humiden) Gebieten. Diese Bodendegradation bewirkt die Ausbreitung bzw. Entstehung von Wüsten oder wüstenähnlichen Verhältnissen. Die meist vorgelagerte Entwicklungsstufe der Steppenbildung wird als Versteppung bezeichnet. Im Deutschen meint der Begriff meist die Wüstenbildung anthropogenen Ursprungs im Gegensatz zur natürlichen Wüstenbildung. Voraussetzung hierfür ist der Eingriff des Menschen in das jeweilige Ökosystem.

Dekommissionierung

Unter Dekommissionierung versteht man den Abbau einer Atomanlage nach Betriebsbeendigung, die Reinigung des Standortes und der Bauelemente von Quellen radioaktiver Strahlung, um diese für eine andere Verwendung zur Verfügung zu stellen. An Arbeitsplätzen ist mit Dekommissionierung die Entfernung von Strahlungsquellen gemeint. Im rechtlichen Sinne wird der Begriff auch für die Entnahme eines Atomstandorts aus dem Atomgesetz verwendet.

Dichotomie

Dichotomie (griechisch *dichōtōmos* „entzweiggeschnitten“ aus *dicha* „zweigeteilt, getrennt“ und *tome* „Schnitt“) bedeutet die Aufteilung in zwei Strukturen oder Begriffe.

EAG

Europäische Atomgemeinschaft auch EURATOM, einer der drei Grundverträge der Europäischen Union.

Economies of Scale

Als Skaleneffekt (Skalenertrag, Größenkostensparnis, *Economies of Scale*) definiert man in der Produktionstheorie der Betriebswirtschaftslehre und in der Mikroökonomie die Abhängigkeit der Produktionsmenge von der Menge der eingesetzten Produktionsfaktoren. Der (marginale) Skalenertrag entspricht der Steigung der Niveau-Produktionsfunktion. Er zeigt an, um welchen Betrag sich die Produktionsmenge verändert, wenn der Einsatz aller Produktionsfaktoren (marginal) um einen bestimmten Faktor erhöht wird.

Epitome

Epitome ist ein kurzer Auszug aus größeren Werken. Epitomieren oder epitomisieren, etwas kurz zusammenfassen, in einen kurzen Auszug bringen. Epitomator, Verfasser einer Epitome.

„Fizzle“ Explosion

Eine im englischen „fizzle“ genannte Explosion liegt bei Nuklearwaffen dann vor, wenn die nukleare Kettenreaktion nicht lange genug aufrechterhalten wird, um eine Explosion unter Ausnutzung der vollen Sprengwirkung auszulösen. Das kann zum Beispiel passieren, wenn die Ladung an spaltbarem Material zu gering ist, die zum Zwecke der Kompression benützten konventionellen Sprengstoffe nicht korrekt zünden, oder die Neutronenquelle nicht korrekt arbeitet. (Die erzielte Sprengwirkung liegt unterhalb der Auslegungs-Sprengwirkung, aber noch über der Sprengladung der verwendeten chemischen Explosivstoffe.)

Gas und Dampfkraftwerk

Moderner Kraftwerkstyp, in dem Wärmekraftmaschinen mit verschiedenen thermodynamischen Kreisläufen - im Konkreten eine Gasturbine und eine Dampfturbine kaskadierend betrieben werden und auf diese Weise pro eingesetzter Primärenergieeinheit ein höherer thermodynamischer bzw. in weitere Folge elektrischer Gesamtwirkungsgrad erzielt wird.

Grundlast

Während einer Zeitspanne (Tag, Woche, Monat oder Jahr) gleichbleibender Teil der Last.

Haubitze

Historisch sind Haubitzen Artillerie-Geschütze mit einem kurzen Lauf (Steilfeuer-Geschütze). In moderner Zeit ist die Unterscheidung zwischen Haubitze und Kanone fließend, ebenso wie die Abgrenzung mit noch kürzerem Rohr zum Mörser. Haubitzen existieren als gezogene Ausführung oder auf (gepanzelter) Selbstfahrlafette (z.B. M109 Panzerhaubitze mit 155 mm Kaliber). „Recoilless“ (rückstoßfreie)-Haubitzen von geringerem Kaliber werden auch auf LKW- Ladeflächen bzw. in Flugzeugen montiert.

Homozygot

Der Begriff Reinerbigkeit (Homozygotie) stammt aus der Genetik. Gibt es für ein Körpermerkmal mehrere verschiedene Ausprägungen (Allele) eines Gens (z.B. verschiedene Haarfarben, Blutgruppen usw.), dann ist das Erbgut reinerbig, wenn für das Körpermerkmal auf dem immer doppelt vorhandenen Chromosomensatz zweimal die gleiche, identische Erbinformation zu finden ist - wenn also beide Elternteile die gleiche Gen-Ausprägung weitergegeben haben. Ist das nicht der Fall, spricht man von gemischterbig, also heterozygoter Anlage. Die Eigenschaft rein- oder mischerbig ist Teil des Genotyps.

Hydrokracken

Kracken - von englisch to crack: „spalten“, ist ein Verfahren der Erdöl-Verarbeitung, wobei Kohlenwasserstoffe hoher Kettenlänge in Kohlenwasserstoffe niedriger Kettenlänge gespalten werden. Ursache dafür ist, dass der Markt mehr kurzkettige Kohlenwasserstoffe (Benzin, Diesel, leichtes Heizöl) fordert, als im Erdöl enthalten ist.

Karzinogen

Karzinogen (auch carcinogen, kanzerogen oder cancerogen) heißt Krebs erzeugend und setzt sich aus Karzinom und Genese zusammen. Ein Karzinogen ist folglich eine Krebs fördernde Substanz oder Strahlung. Karzinogene kann man in zwei Gruppen unterteilen: Initiierende Karzinogene sind Stoffe, die Krebs erzeugen können; Promovierende Karzinogene hingegen fördern die (Weiter-)Entwicklung des Krebses.

Kohlenstoff-Sequestrierung

Als CO₂-Sequestrierung oder CO₂-Speicherung (im Englischen: carbon capture (CC) oder auch carbon capture and storage (CCS) werden chemische, physikalische und biologische Verfahren bezeichnet, mit denen das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus den Emissionen bei der Verbrennung fossiler Energieträger abgetrennt und danach eingelagert werden soll, um nicht in die Atmosphäre zu gelangen. Grund für diese Bemühungen sind der Treibhauseffekt und die daraus resultierende globale Erwärmung.

Kohlenwasserstoffe

Die Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) sind eine Stoffgruppe von Verbindungen, die aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen. Die Stoffgruppe ist die einfachste der organischen Chemie. Die Kohlenwasserstoffe haben, vor allem durch ihre riesigen Vorkommen als fossile Brennstoffe, auch in vielen weiteren Bereichen, wie der organischen Synthese, eine große technische Bedeutung erlangt. Das Methan, ein Alkan, ist der einfachste Vertreter der Kohlenwasserstoffe und Hauptbestandteil des Erdgases.

Kolloide

Kolloide - zu griechisch kólla „Leim“ - sind Teilchen in einer Suspension, die groß genug sind, um keine Quanteneigenschaften mehr aufzuweisen, aber klein genug, damit ihre Bewegung von der Thermodynamik dominiert wird. Typischerweise haben sie einen Radius von etwa 0,1 - 10 Mikrometer. Kolloide können fest, flüssig oder gasförmig in einem anderen Stoff (dem Dispersionsmittel) verteilt sein, zum Beispiel in Seifenlaugen und Lacken.

Kontradiktorisches Verfahren

Das Recht auf ein faires Verfahren erfordert ein kontradiktorisch (adversatorisch) ausgestaltetes Verfahren. Es bedeutet, dass sowohl der Anklage als auch der Verteidigung die Gelegenheit gegeben werden muss, von den Verfahrensbeiträgen der Gegenseite Kenntnis zu erhalten und diese zu kommentieren.

Last

An einer angegebenen Stelle in Anspruch genommene Leistung.

Least developed countries

Least Developed Countries (LDCs oder vierte Welt Länder) sind jene Länder, die gemäß Klassifikation der Vereinten Nationen die niedrigsten Indikatoren sozioökonomischer Entwicklung mit den niedrigsten „Human Development Index Ratings“ der Staaten der Welt aufweisen.

Leichtwasserreaktor

Der Leichtwasserreaktor (LWR) ist ein Reaktortyp, bei dem so genanntes leichtes Wasser als Kühlmittel und Moderator verwendet wird. „Leichtes Wasser“ bezeichnet dabei gewöhnliches Wasser, dessen Wasserstoffatome überwiegend als Protium, dem leichtesten Wasserstoffisotop, vorliegen.

Leukämie

Die Leukämie (griechisch λευχαιμία, von λευκό, lefkó - das weiße und αίμα, äma - das Blut), genau betrachtet nur eine Unterart des so genannten Blutkrebses, aber häufig mit diesem synonym benutzt, ist eine Erkrankung des blutbildenden Systems.

MOX

Ein Mischoxid (kurz MOX) ist ein Stoff, der sich aus mehreren Oxiden zusammensetzt. Ein Beispiel aus der Kerntechnik sind die MOX-Brennelemente, die aus Uranoxid UO_2 und Plutoniumdioxid PuO_2 bestehen (siehe Brennstab). Sie werden heute in verschiedenen Ländern (vor allem Frankreich und Deutschland, aber auch in der Schweiz und Belgien) in Kernreaktoren eingesetzt, um das bei der Wiederaufarbeitung abgetrennte Plutonium zu verwerten und es gleichzeitig für Kernwaffen weitgehend unbrauchbar zu machen.

Mutagen

Mutagene sind äußere Einwirkungen, die Mutationen oder Chromosomenaberrationen auslösen. Dazu zählen Strahlung (Röntgen-, ionisierende und UV-Strahlung), Nitrosamine, Basenanaloga und Teerstoffe, aber auch abnorm hohe Temperaturen, um einige Vertreter der physikalischen Mutagene zu nennen. Die normale Mutationsrate (Häufigkeit, mit der sich ein Gen verändert) bei höheren Organismen liegt bei 10^{-5} – 10^{-9} pro Gen und Generation. Ein Anstieg der Mutationsrate ist durch Mutagene möglich.

Nachhaltigkeit

Nachhaltige Entwicklung - eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt ohne dabei die Fähigkeit zukünftiger Generationen, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen, einzuschränken.

Negajoules

Negajoules stehen für Energiemengen, die wegen verbesserter Energieeffizienz nicht verbraucht werden.

Nukleare Wiederaufarbeitung

Die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, gelegentlich auch „Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen“ genannt, wurde ursprünglich aus militärischen Gründen entwickelt. Im zivilen Bereich enthalten abgebrannte Brennelemente aus zivilen Leistungsreaktoren noch rund 96 % unverbrauchtes Uran und 1 % Plutonium. Beides sind Stoffe, die im Prinzip zu neuen Brennelementen verarbeitet werden können. Die restlichen 3 % sind Spaltprodukte und höhere Aktinide, die den eigentlichen radioaktiven Abfall ausmachen. Die Wiederaufarbeitung ist ein technischer Vorgang, mit dessen Hilfe das spaltbare Material von den übrigen Bestandteilen separiert werden kann.

Ölsand

Ölsande, im Englischen auch als „tar sands“ also Teersande bzw. „bituminous sands“ bezeichnet, sind eine Kombination von Lehm, Sand, Wasser und Bitumen. Technisch gesehen ist das Bitumen weder Öl noch Teer, aber eine halb feste, degradierte Form von Öl, die wegen ihrer Zähflüssigkeit nicht über normale Bohrlöcher förderbar ist, was die Produktion schwierig und teuer macht. Ölsande werden abgebaut, um anschließend das ölähnliche Bitumen extrahieren zu können, das in weiterer Folge in synthetisches Rohöl umgewandelt oder mittels spezieller Raffinerien direkt in Erdölprodukte raffiniert wird. Ölsande werden im Tagebau abgebaut oder mittels Dampf bzw. Lösungsmitteln und Reduktion der Viskosität „ausgetrieben“.

Opportunitätskosten

Unter Opportunitätskosten (selten auch Alternativkosten oder Verzichtskosten) versteht man in der Wirtschaftswissenschaft Kosten, die dadurch entstehen, dass Möglichkeiten (Opportunitäten) zur Nutzung von Ressourcen nicht wahrgenommen wurden. Allgemeiner: Opportunitätskosten sind der Nutzenentgang, der bei zwei Alternativen durch die Entscheidung für die eine und gegen die andere Möglichkeit entsteht. Gelegentlich wird für Opportunitätskosten die Bezeichnung Schattenpreis verwendet.

OSPAR Kommission

Entscheidungsorgan im Rahmen des OSPAR Übereinkommens: Abkommen mit dem Ziel der Verhütung und Beseitigung der Verschmutzung sowie Schutz des Meeres gegen schädliche Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten.

Paradigma

Nach dem Wissenschaftstheoretiker Kuhn ein vorherrschendes Denkmuster in einer bestimmten Zeit. Paradigmen spiegeln einen gewissen allgemein anerkannten Konsens über Annahmen und Vorstellungen wider, die es ermöglichen, für eine Vielzahl von Fragestellungen Lösungen zu bieten.

Paradigmenwechsel

Als Paradigmenwechsel wird eine (oft radikale) Änderung des Blickwinkels auf ein wissenschaftliches Feld, auf dessen Paradigma, bezeichnet und dabei die Grundlage für eine Weiterentwicklung gegeben. Festgestellt wird dieser Wechsel von der betreffenden „Wissenschaftsgemeinde“.

Phänologie

Die Phänologie befasst sich mit dem im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Entwicklungserscheinungen in der Natur. Das Wort stammt aus dem Griechischen und bedeutet wörtlich übersetzt „Lehre von den Erscheinungen“. Die Phänologie beschäftigt sich hauptsächlich mit biologischen Prozessen im Kontext der Ökologie und Biogeographie. Die Eintrittszeiten charakteristischer Erscheinungen werden in einem phänologischen Kalender festgehalten. Dieser unterteilt das Phänologische Jahr in physiologisch-biologisch begründete zehn Jahreszeiten und orientiert sich an charakteristischen Entwicklungsstadien typischer mitteleuropäischer Pflanzen (Phänologische Zeigerpflanzen).

Proliferation

Proliferation ist im Rüstungsbereich die Bezeichnung für die Weiterverbreitung bzw. die Weitergabe von Massenvernichtungswaffen und ihren Trägersystemen von Staaten, die über derartige Technologien verfügen, an andere Staaten, die noch nicht darüber verfügen.

PUREX-Prozess

Der PUREX-Prozess ist ein physikalisch-chemisches Verfahren, das bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente zur Trennung der darin enthaltenen Spaltstoffe Uran und Plutonium von den nicht mehr verwendbaren radioaktiven Abfallstoffen eingesetzt wird. Die Abkürzung PUREX steht für „Plutonium-Uranium Recovery by Extraction“.

Radiolyse

Unter Radiolyse versteht man die Zerlegung einer chemischen Bindung unter Einwirkung ionisierender Strahlung. Meist wird mit dem Begriff die Radiolyse von Wasser angesprochen.

Radiotoxizität

Ein Maß, das angibt, wie sich ein Radionuklid negativ auf die Gesundheit auswirkt. Die Art und der Energiegehalt von Strahlung, die Absorption in einem Organismus, die Verweildauer im Körper beeinflussen unter anderem den Grad der Radiotoxizität eines Radionuklides.

RODOS

Ein Softwareprogramm. Im Falle eines nuklearen Unfalles in Europa liefert das „Real-time On-line Decision Support System for off-site Emergency Management in Europe“ (RODOS) konsistente Information über die gegenwärtige und zukünftige radiologische Situation, die Vor- und Nachteile bestimmter Noteinsätze und Gegenmaßnahmen, sowie methodologische Unterstützung in der Entscheidungsfindung über strategische Notfallplanung. Die Hauptanwender des Systems sind Verantwortliche für Katastrophenschutz auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene.

RPG

Eine (engl.) rocket propelled grenade (RPG) ist eine unscharfe Bezeichnung für tragbare schultergestützte Panzerabwehrwaffen, die in der Lage sind eine ungelenkte Rakete mit einem Explosiv-

sprengkopf abzufeuern - im Deutschen am Besten mit Panzerabwehrrohr umschrieben. RPG ist eigentlich die russische Abkürzung für „Ruchnoy Protivotankovy Granatomyot“ korrekt übersetzt ins englische als „handheld antitank grenade-launcher“. Der verbreitete Begriff „rocket-propelled grenade“ ist aus einer Fehlübersetzung als Nachbildung der Abkürzung RPG entstanden, folgt aber nicht den korrekten Namenskonventionen die von englischsprachigen Militärs zur Beschreibung dieser Waffen verwendet werden.

Schneller Brüter

Ein Brutreaktor ist ein Kernreaktor, der nicht nur zur Energiegewinnung, sondern gleichzeitig zur Erzeugung von weiterem spaltbarem Material dient. Der Betrieb mit schnellen Neutronen macht den Brutreaktor zum „schnellen Brüter“.

Seller's Market

Jargon-Bezeichnung für ein Umfeld das generell Käufer bevorzugt. Ein solcher Markt existiert, wenn die Nachfrage der qualifizierten Käufer generell das vorhandene Warenangebot übersteigt. Im Spiel von Angebot und Nachfrage ist dies eine Situation, in der das Angebot an Gütern mit der Nachfrage nicht mehr Schritt halten kann.

Siedewasserreaktor

Der Siedewasserreaktor (kurz SWR) ist ein Atomreaktor, der dem Druckwasserreaktor in Vielem ähnelt. Er gehört, wie der Druckwasserreaktor, zu den Leichtwasserreaktoren. Im Gegensatz zum Druckwasserreaktor gibt es aber nur einen Wasser/Dampfkreislauf.

Sievert

Das Sievert ist die Einheit der Äquivalentdosis. Die Angabe erfolgt üblicherweise in mSv (milli-Sievert). Verschiedene Strahlungsarten erzeugen unterschiedliche biologische Wirkungen. Dem wird im Strahlenschutz durch einen normativ festgelegten Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R , früher Qualitätsfaktor Q , Rechnung getragen, über den die Energiedosis in die Äquivalentdosis überführt wird.

Einheitenzeichen: Sv

Formelzeichen: H (Harm: englisch Schaden)

Benannt ist die Einheit nach dem schwedischen Mediziner und Physiker Rolf Sievert (1896-1966).

Vor dem 31. Dezember 1985 hieß die Einheit der Äquivalentdosis Rem (rem). $1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$.

Die Äquivalentdosis ist ein spezieller Dosisbegriff aus dem Strahlenschutz. Sie dient zur Ermittlung der Strahlenbelastung auf den Menschen. Ähnlich wie die Organdosis berücksichtigt sie durch die Strahlungs-Wichtungsfaktoren die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Strahlungsarten auf das menschliche Gewebe. Im Unterschied zur Organdosis ist die Äquivalentdosis jedoch ein abstrakterer, mehr allgemeiner Begriff. Sie beinhaltet die Energiedosis (die absorbierten Dosis) im so genannten ICRU-Weichteilgewebe, einem standardisierten Phantom-Gewebe fester Zusammensetzung. Die Organdosis berücksichtigt dahingegen die mittlere Energiedosis in einem einzelnen (realen) Organ, Gewebe oder Körperteil.

Stickoxide oder NO_x

Stickoxide oder Stickstoffoxide ist eine Sammelbezeichnung für die gasförmigen Oxide des Stickstoffs. Sie werden auch mit NO_x abgekürzt, da es auf Grund der vielen Oxidationsstufen des Stickstoffs mehrere Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen gibt. Manchmal wird die Abkürzung NO_x auch für die sogenannten Nitrosen Gase (siehe unten) verwendet.

Tamper

Im Design von Nuklearwaffen eine Hülle, die den Kern an spaltbarem Material umgibt und das Nuklearmaterial während der Explosion für eine längere Zeitspanne zusammenhält und so die Sprengkraft signifikant anheben kann.

Tonnen Öläquivalent

Auch Tonnen Öleinheiten (Abkürzung engl. toe) - eine Maßeinheit für Energie. 1 toe ergibt umgerechnet 10 Gcal_{th} oder 41.868 GJ, oder 11,63 MWh. Sie entspricht der Energiemenge, die bei der Verbrennung einer metrischen Tonne Rohöl freigesetzt wird. Nachdem die chemischen Eigenschaften von Rohöl Schwankungen unterliegen, ist der genaue Wert durch Konvention festgelegt.

Toxizität

Die Toxizität (von griechisch τοξικότητα, aus toxikón (phármakon) - Pfeil(gift) aus toxa - Pfeil und Bogen) bedeutet die Giftigkeit. Die Toxizität einer Substanz wird mit Hilfe verschiedener Verfahren bestimmt. Die wohl bekannteste Messgröße für Toxizität ist der LD50 Wert.

Radiotoxizität, Chemotoxizität.

Transaktionskosten

Transaktionskosten sind diejenigen Kosten, die durch die Benutzung des Marktes (market transaction costs), also im Zusammenhang mit der Transaktion von Verfügungsrechten (z.B. Kauf, Verkauf, Miete), oder einer innerbetrieblichen Hierarchie (managerial transaction costs) entstehen. Die Transaktionskostentheorie besagt, dass bei jeder Transaktion auch Transaktionskosten entstehen. Die Transaktionskostentheorie ist ein elementarer Bestandteil der Neuen Institutionenökonomik. Transaktionskosten sind die Folge der begrenzten Rationalität der Akteure in Kombination mit Opportunismus, Komplexität der Umwelt und Spezifität der Investitionen.

Transmutation

In der Kerntechnik steht der Begriff Transmutation für ein Verfahren zur Umwandlung langlebiger, stark toxischer Radionuklide (Plutonium und andere Aktiniden) aus dem Betrieb von Kernkraftwerken in kurzlebiger, weniger toxische Nuklide.

Treibhausgase

Treibhausgase sind gasförmige Komponenten der Atmosphäre, die zum sogenannten „Treibhauseffekt“ beitragen. Einige Treibhausgase kommen natürlich in der Atmosphäre vor, während

andere ausschließlich das Resultat menschlicher Aktivitäten sind. Natürlich vorkommende Treibhausgase inkludieren Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Stickoxide und Ozon. Bestimmte menschliche Aktivitäten erhöhen den Anteil dieser natürlich vorkommenden Gase in der Atmosphäre.

UNFCCC

Die United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC or FCCC) ist ein internationales Abkommen, erstellt auf der „United Nations Conference on Environment and Development (UNCED)“, die in Rio de Janeiro 1992 abgehalten wurde. Das Abkommen zielt auf eine Emissionsreduktion von Treibhausgasen zur Bekämpfung der globalen Erwärmung ab.

Uranhexafluorid

Uranhexafluorid, UF_6 , ist eine leicht flüchtige, äußerst giftige, radioaktive und korrosive Verbindung aus Uran und Fluor, die in der Uran-Anreicherung eingesetzt wird.

Uran-Konzentrat (Yellow Cake)

Yellowcake (dt. gelber Kuchen) ist eine pulverförmige Form des Urans, das aufgrund seiner Farbe so benannt wurde. Aus zwei Tonnen abgebautem Erz wird in Uranmühlen ungefähr ein Kilogramm Yellowcake gewonnen. Es besteht zu 70 bis 80 % aus Uran-Verbindungen (wie Uranoxid (U_3O_8)) - hinzu kommen Ammonium- oder Magnesiumdiuranat.

Weltenergierat

Der Weltenergierat (engl.: World Energy Council, WEC) ist eine weltweite Organisation mit Mitgliedsausschüssen in über 90 Ländern. Seinen Mitgliedern (Energieproduzenten, -verbraucher, -händler, Umweltschutzorganisationen, Forschungsorganisationen, Regierungsorgane) bietet er verschiedene Dienstleistungen, darunter Forschung, Analysen und Strategieempfehlungen, welche sich auf viele Energieträger beziehen (Kohle, Öl, Gas, erneuerbare Energien). Sitz des WEC ist London.

WHO

Die Weltgesundheitsorganisation (engl. World Health Organization, WHO) ist eine UN-Spezialorganisation, die ihren Hauptsitz in Genf (Schweiz) hat. Sie wurde am 7. April 1948 gegründet und zählt 192 Mitgliedstaaten. Sie ist die Koordinationsbehörde der Vereinten Nationen für das internationale öffentliche Gesundheitswesen.

Die AutorInnen

Die AutorInnen

Oda Becker

Professorin an der Fachhochschule Hannover; außerdem freiberufliche wissenschaftliche Beraterin für Energie und Umwelt; Hannover, Deutschland

Oda Becker studierte Physik und Erwachsenenbildung an der Universität Hannover. Sie arbeitet seit vielen Jahren als unabhängige Konsultantin im Bereich der Sicherheit und Sicherung von Atomanlagen. Zu ihren Auftraggebern gehören neben der österreichischen Bundesregierung und deutschen Stadtverwaltungen auch Bürgerinitiativen und Umweltorganisationen.

Arbeiten in letzter Zeit u.a.: Studien zu den Gefahren von Behälterlagern für abgebrannten Brennstoff; Beitrag zu einer Studie zur Verwundbarkeit der deutschen Kernkraftwerke Biblis und Brunsbüttel gegenüber Terrorangriffen; Mitarbeit an einer Studie über die andauernden Gefahren der Atomtechnik im 21. Jahrhundert; Studie zur Situation am AKW Standort Tschernobyl; Arbeiten zur geplanten Betriebszeitverlängerung des KKW Paks, Ungarn; Studie zu schweren Unfällen im norddeutschen Kernkraftwerk Unterweser (Schwerpunkt: Terror-Angriff).

Antony Froggatt

Unabhängiger Europäischer Energiekonsulent

Seit 1997 ist Antony Froggatt als freier Konsulent in Energie- und Nuklearfragen in der EU und Anrainerstaaten tätig. Er hat zahlreiche Aufträge zu energiepolitischen Fragen in der EU für Europäische Regierungen, die Europäische Kommission und das Europäische Parlament, Umweltorganisationen und Wirtschaftskörper bearbeitet. Er wurde als Experte zu Anfragen und Hearings in den Parlamenten von Österreich, Deutschland und der EU angehört. Er hat auch viel mit Umweltgruppen in Osteuropa gearbeitet, insbesondere in der Vorbereitungsphase für die EU-Erweiterung, zur Errichtung eines Energie-Effizienz-Netzwerkes. Er tritt regelmäßig als Sprecher bei Tagungen, an Universitäten und bei Ausbildungsprogrammen quer durch die Region und Europa auf.

Vor seiner Tätigkeit als freier Konsulent war er neun Jahre als Nuklear-Campaigner und Koordinator für Greenpeace International tätig.

Helmut Hirsch

Wissenschaftlicher Konsulent für Fragen der nuklearen Sicherheit und Sicherung. Österreichischer Staatsbürger, lebt in Deutschland.

Mitglied des Forum für Atomfragen (FAF)

Ausbildung zum Strahlenschutztechniker im Österreichischen Forschungszentrum Seibersdorf, Studium der Physik an der Universität Wien.

In den 30 Jahren seiner Laufbahn als Nuklearexperte war Helmut Hirsch für die österreichische Bundesregierung tätig, sowie auch für deutsche Landesregierungen und Stadtverwaltungen,

und internationale Nichtregierungs-Organisationen. Er war wissenschaftlicher Koordinator der Informationskampagne Kernenergie der österreichischen Bundesregierung 1976/77 und gründete 1981 Gruppe Ökologie Hannover, ein ökologisches Forschungsinstitut, wo er bis 1995 blieb. Danach war er als Nuklearexperte im deutschen Greenpeace-Büro beschäftigt und arbeitet seit 1997 freiberuflich.

Arbeiten in letzter Zeit schließen ein: Mitwirkung beim Monitoring des tschechischen KKW Temelín auf technischer Ebene; Teilnahme an einer Studie potenzieller Gefahren durch das Zwischenlager für abgebrannte Brennelemente im Skull Valley, Utah (USA); Bewertung möglicher Maßnahmen gegen Terrorangriffe auf Kernkraftwerke; Bewertung der schweizer Pläne für ein nukleares Endlager, im Hinblick auf potenzielle Auswirkungen auf österreichisches Staatsgebiet, und des schweizer Vorgehens bei der Standortwahl für ein Endlager; Mitgliedschaft bei der Expertengruppe zu den Auswirkungen des längerfristigem Betriebes nuklearer Kapazitäten der Kernenergieagentur der OECD; Arbeiten zur geplanten Betriebszeitverlängerung des KKW Paks, Ungarn.

Georgui Kastchiew, Dr.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Wien, Institut für Risikoforschung

G. Kastchiew graduierte 1972 als Diplomphysiker von der Universität in Sofia, Bulgarien und begann anschließend seine berufliche Laufbahn als Reaktorphysiker im Kernkraftwerk Kosloduj, Bulgarien. 1987 erhielt er ein Ph.D. in Reaktorphysik von der Universität in Sofia, Bulgarien. 1989 bis 1993 lehrte er am Institut für Nukleartechnik, Kosloduj/Sofia, und verbrachte 1994 ein Jahr als Gasttechniker beim AP 600 Projekt von Westinghouse, USA. Von 1995 bis 1997 war Dr. Kastchiew Konsulent des Institutes für Risikoforschung der Universität Wien, Österreich, bis er 2002 zum Leiter der bulgarischen nuklearen Aufsichtsbehörde ernannt wurde. Nach vier Jahren bei der Aufsichtsbehörde verbrachte er ein Jahr als Gastprofessor am Tokyo Institute of Technology. Seit 2002 ist er wieder am Institut für Risikoforschung der Universität Wien tätig.

Wolfgang Kromp, a.o. Univ. Prof. Dr.

Universitätsprofessor an der Universität Wien, Institut für Risikoforschung, Mitglied des Forum für Atomfragen (FAF)

Physikstudium sowie Promotion 1970 und Habilitation 1984 an der Universität Wien. Assistent am Institut für Materialphysik der Universität Wien, 1997 Außerordentlicher Professor. Seit 1995 Leiter des Institutes für Risikoforschung an der Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie der Universität Wien. 1975 bis 1991 Gastwissenschaftler am Max-Planck Institut in Stuttgart bzw. Gastprofessor und an der Carnegie-Mellon University in Pittsburg, USA. Angewandte werkstoffwissenschaftliche Forschung sowie interdisziplinäre Befassung mit Risikofragen zu gesellschaftlich relevanten Themen wie Risiken der Kernenergie, sozioökonomische Begleitforschung zur Kernfusion, nachhaltige Energiebereitstellung aus Biomasse oder erdölfreie Nahrungsmittelproduktionssicherheit. Mitglied der Wissenschaftskommission beim Österreichischen Bundesministerium für Landesverteidigung und des österreichischen Fachnormenausschusses ON-K 246 für Risiko-, Sicherheits- und Krisenmanagement. Konrad-Lorenz-Preis 1991 des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Helga Kromp-Kolb, Univ.-Prof. Dr.

Universitätsprofessorin an der Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Meteorologie, Vorsitzende des Forum für Atomfragen (FAF)

Helga Kromp-Kolb besuchte Schulen in Frankreich, Luxemburg, Indien und Österreich und studierte Meteorologie an der Universität Wien. Als Universitätslehrerin und Forscherin liegt ihr Schwerpunkt bei der Umweltmeteorologie, insbesondere Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre, UV-Strahlung und stratosphärischer Ozonabbau, und Klimawandel. Ihre Publikationen umfassen Studien zur Ausbreitung radioaktiver Substanzen von Tschernobyl und für hypothetische Unfälle in grenznahen Kernkraftwerken ebenso wie methodische und praktische Arbeiten zur Regionalisierung von GCM Klimaszenarien auf den alpinen Raum. Sie ist Mitglied einer Reihe von wissenschaftlichen Beratungsgremien im Wissenschaftsbetrieb und für die Österreichische Bundesregierung. Mit einer kurzen Unterbrechung ist sie Vorsitzende des Forum für Atomfragen seit seiner Gründung im Jahr 1990.

Roman Lahodynsky, Dr.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Wien, Institut für Risikoforschung

Studium der Geologie und Paläontologie (Nebenfach Geophysik) an den Universitäten in Wien und Innsbruck und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geophysik der TU-Wien (Sedimentologie von Tiefseeablagerungen, erdgeschichtliche Katastrophen, Gesteinsgefüge, Gebirgsspannungsmessungen, Rutschungen), an der Geologischen Bundesanstalt (Kreide/Tertiär - Asteroidenimpakt, geologische Kartierungen), sowie in geologischen Ingenieurbüros (Altlastenerkundung, Deponiestandortsuche, Grundwasserexploration und Trinkwasserschutzgebiete, Bahn- und Strassentunnelaufnahmen). Strahlenschutztechnikerausbildung im Reaktorzentrum Seibersdorf im Rahmen des Militärdienstes. Projektsassistent am Institut für Risikoforschung der Univ. Wien: seismische Gefährdung nuklearer Anlagen (Standortsicherheit), geologische Probleme der radioaktiven Endlager, Trinkwasser- und Abfallprobleme (EU-China – Nachhaltigkeitsprojekt 2002-2005).

Franz Meister

Mitarbeiter des Umweltbundesamtes Wien

Meister studierte Geschichte, Politikwissenschaft und Philosophie an der Universität Wien, arbeitete ab 1986 am Österreichischen Ökologie-Institut in der Energieabteilung bevor er 1991 zum Umweltbundesamt wechselte. Seine Hauptschwerpunkte sind: Energie- und umweltpolitische Fragestellungen, Energie- und Emissionsmodelle, sowie Gefahren grenznaher Atomkraftwerke. Er koordinierte Projekte des Umweltbundesamtes zu Khmelnitzky2/Rowno4, KKW Temelín, KKW Mochovce, KKW Bohunice, Deutsche Brennelemente-Zwischenlager, Schweizer Endlagerprojekt sowie KKW Paks, wie auch Fachstellungnahmen zu den Energiekonzepten Tschechische Republik und Slowakische Republik.

Nikolaus Müllner

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Wien, Institut für Risikoforschung und an der Universität Pisa, Dipartimento Ingegneria, Meccanica, Nucleare e della Produzione; Doktoratsstudent an der Universität Wien, IRF, bei Prof. W. Kromp

Müllner studierte Physik an der Universität Wien und an der Technischen Universität Berlin. Nach Abschluss seines Studiums 2001 war er zwei Jahre im Bereich IT in London tätig, und entschloss sich 2003 das Angebot für ein Doktorat und Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Risikoforschung anzunehmen. Im Rahmen dieser Tätigkeit ist er derzeit an der Universität Pisa. Seine Tätigkeitsfelder sind Sicherheitsanalysen im Reaktorbereich mit den Thermo-Hydraulischen System Codes Relap5 und Cathare2 und Analysen schwerer Unfälle mit dem Integral-Code Melkor, sowie Projektvorbereitung und Projektleitung.

Manfred Rotter, Univ.-Prof. Dr.

Universitätsprofessor emer. an der Johann Kepler Universität Linz, Institut für Völkerrecht und Internationale Beziehungen
Mitglied des Forum für Atomfragen (FAF)

Universitätsprofessor für Völkerrecht, Europarecht und Internationale Beziehungen an der Johannes Kepler Universität Linz (seit 1983); Vorstand des Instituts für Europarecht (1990 - 2004); Vorstand des Instituts für Völkerrecht und Internationale Beziehungen (1996 -2004); Direktor des Europäischen Dokumentationszentrums der Europäischen Kommission an der Universität Linz (1990 - 2004); Mitglied des Wissenschaftlichen Beirates der Rektorenkonferenz der Arbeitsgemeinschaft Alpen Adria (1982-1997); Mitglied des Leitungsgremiums der Tschechisch Österreichischen Aktion zur Wissenschaftlichen Kooperation (seit 1996); Emeritus seit Oktober 2004.

Zahlreiche Beiträge zu mannigfachen Problemstellungen des Völkerrechtes, des Gemeinschaftsrechtes und der Internationalen Beziehungen. Die jüngsten sind den Fallstricken der KKW Sicherheit im Gemeinschaftsrecht, den Spuren der reinen Rechtslehre im Völkerrecht, dem Wandel des „Verteidigungsbegriffes“ und zuletzt den Problemen um den sogenannten israelischen Sicherheitszaun auf palästinensischem Territorium gewidmet.

Steven Sholly

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Wien, Institut für Risikoforschung

Steven Sholly studierte am Shippensburg State College (jetzt Shippensburg University) in Pennsylvania in den USA und schloss 1975 mit einem Bachelor of Science Diplom in Science Education ab. Seit 1979 befasste er sich mit Gefahrenanalysen, Sicherheitsanalysen, Risikoabschätzungen und Umweltverträglichkeitsanalysen in erster Linie in Zusammenhang mit nuklearen und gefährlichen chemischen Anlagen. Herr Sholly war als Konsulent im Bereich seismischer Überprüfungen für die US Nuclear Regulatory Commission's Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) tätig und führte auch Unfallanalysen für Los Alamos National Laboratory und die ehemalige Rocky Flats Anlage (jetzt weitgehend dekommissioniert) des US Department of Energy durch, Anlagen die mit Nuklearwaffen befasst waren. Herr Sholly ist seit 1988 in Öster-

reich und arbeitet am Institut für Risikoforschung der Universität Wien. Er ist derzeit Mitglied des Nuclear Safety Standards Committee (NUSSC) der IAEA für 2004-2007.

Geert Weimann, DI

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, seibersdorf research G.m.b.H, Seibersdorf, Österreich
Mitglied des Forum für Atomfragen (FAF)

Nach dem Maschinenbau-Studium an der Technischen Universität in Wien und Tätigkeit in der Anlagenplanung, hat er sich mit Graduate Trainings für Kerntechnik in den USA und Deutschland die Grundlagen zum Fachmann für Sicherheitsfragen von Nuklearanlagen erarbeitet. Praktische Erfahrung mit Genehmigung und Inbetriebsetzung, sowie mit Störfallplanung und Management von Störfallfolgen folgten. Die Auslegung von Druckwasserreaktoren, Hochtemperaturreaktoren, einem Schnellen Brüter und Sicherheitsanalysen zu Spallator- und Fusionseinrichtungen waren Anwendungen. Beim EU-Beitritt Österreichs untersuchte er Energieversorgungsfragen hinsichtlich langfristiger Optionen und Einsparungstechnologien. Als Nukleartechnologe mit einer Vielzahl von Sicherheitsuntersuchungen zur Auslegung und zum Betrieb, sowie zum Langzeitbetrieb von Kernkraftwerken befasst, ist er heute 35 Jahre in der Energietechnologie tätig. Er ist Co-Autor einer Anzahl von detaillierten Studien in den genannten Sachgebieten.

Peter Weish, Univ.-Doz. Dr.

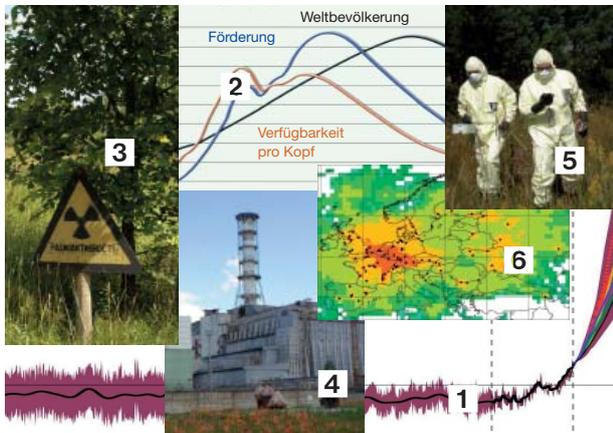
Universitätsdozent an der Universität Wien, Fakultätszentrum Ökologie
Mitglied des Forum für Atomfragen (FAF)

Studium an der Universität Wien (Chemie, Physik, Biologie), Tätigkeit im Inst. f. Strahlenschutz der Studiengesellschaft für Atomenergie (RZ Seibersdorf), am Inst. f. Zoologie BOKU, Institut für Umweltwissenschaften und Naturschutz der ÖAW.

Seit Ende der 1960er Jahre kritische Auseinandersetzung mit den Problemen der Atomkraft aus humanökologischer Sicht sowie mit allgemeinen Fragen von Energie, Natur- und Umweltschutz sowie Entwicklungszusammenarbeit. Mitarbeit in verschiedenen Umweltorganisationen und Beratungsgremien. Lehrtätigkeit (Humanökologie und Umweltethik) an der BOKU und der Universität Wien.

Notizen

Erläuterungen zu den Abbildungen des Deckblattes



- 1 Zeitliche Entwicklung der mittleren Temperatur auf der Nordhemisphäre in den letzten 1000 Jahren [IPCC 2001]
- 2 Erdölförderraten, Entwicklung der Weltbevölkerung und Verfügbarkeit von Erdöl pro Kopf im Zeitraum 1950 bis ca. 2100; Fördermaximum um 2010 [Kromp-Kolb und Formayer 2006]
- 3 Warnschild in der Tschernobyl Sperrzone [Photo: Kromp-Kolb]
- 4 Sarkopharg über dem verunglückten Block 4 des Kernkraftwerkes Tschernobyl [Photo: Kromp-Kolb]
- 5 Strahlenschutzübung des Institutes für Risikoforschung der Universität Wien in der 30-km-Sperrzone um das KKW Tschernobyl 2005 [Photo: Kromp-Kolb]
- 6 Verteilung des nuklearen Risikos durch kommerzielle Reaktoren in Europa nach Modellberechnungen des Projektes „Risk-map“ 1999
[<http://www.umweltbundesamt.at/umwelt/kernenergie/akw/riskmap/?wai=1>]

Kontakt

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung V/6 Nuklearkoordination
Stubenbastei 5
1010 Wien
Tel. +43 1 515 22-4004
Email: nuklearkoordination@lebensministerium.at
www.lebensministerium.at

Univ. Prof. Helga Kromp-Kolb
Vorsitzende des Forum für Atomfragen
c/o Universität für Bodenkultur
Institut für Meteorologie
Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Peter Jordanstraße 82
1180 Wien
Tel. +43 1 47654-5601
Email: helga.kromp-kolb@boku.ac.at
www.boku.ac.at

Informationen zu Landwirtschaft, Lebensmittel,
Wald, Umwelt und Wasser:

www.lebensministerium.at



lebensministerium.at

Das Aktionsprogramm des Lebensministeriums
für aktiven Klimaschutz:

www.klimaaktiv.at



Die Jugendplattform rund ums Wasser:

www.generationblue.at



Die bundesweite Initiative zur getrennten
Sammlung von Altstoffen:

www.richtigsammeln.at



Die Internetseite zur Österreichischen
Nachhaltigkeitsstrategie:

www.nachhaltigkeit.at



Das Internetportal der Österreichischen
Nationalparks:

www.nationalparks.at



Der Walddialog ist die Suche nach Problem-
lösungen für Interessenkonflikte im Waldbereich:

www.walddialog.at



Das Österreichische Umweltzeichen ist Garant
für umweltfreundliche Produkte und
Dienstleistungen:

www.umweltzeichen.at



Umweltdaten u.a. zu den Bereichen Wasser,
Luft, Lärm, Kernenergie, Klima, Gentechnik,
Altlasten, erhebt laufend das UBA:

www.umweltbundesamt.at

umweltbundesamt^U

Waldforschungszentrum BFW. Forschung,
Monitoring und Wissenstransfer zu Wald und
Naturgefahren:

<http://bfw.ac.at>



